



UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
PROYECTO DE GRADO



AUTOR DEL PROYECTO: PUENTES PEÑUELA JUAN PABLO
CÓDIGO: 06591036

TELÉFONO: 3134097693

CEDULA: 1019037856

CORREO ELECTRÓNICO: juanp.puentes@unilibrebog.edu.co



**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE
REVENIDO EN LOS VALORES DE DUREZA DE UN ACERO AISI-SAE 1045
TEMPLADO DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS CON RELACIÓN A LA
ECUACIÓN DE J.H.HOLLOMON – JAFFE**

DIRECTOR: CARLOS ARTURO BOHÓRQUEZ ÁVILA
PROFESIÓN: INGENIERO MECÁNICO
CORREO ELECTRÓNICO: carlosa.bohorqueza@unilibrebog.edu.co
TEMA DE ÁREA DE INVESTIGACIÓN: MATERIALES

AUTOR DEL PROYECTO

AUTOR DEL PROYECTO

DIRECTOR DE PROYECTO

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE
REVENIDO EN LOS VALORES DE DUREZA DE UN ACERO AISI-SAE 1045
TEMPLADO DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS CON RELACIÓN A LA
ECUACIÓN DE J.H.HOLLOMON – JAFFE

PRESENTADO POR:
JUAN PABLO PUENTES PEÑUELA

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2016

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE
REVENIDO EN LOS VALORES DE DUREZA DE UN ACERO AISI-SAE 1045
TEMPLADO DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS CON RELACIÓN A LA
ECUACIÓN DE J.H.HOLLOMON – JAFFE

PRESENTADO POR:
JUAN PABLO PUENTES PEÑUELA

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico

Director:
Ph.D Ingeniero Carlos Arturo Bohórquez Ávila

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2016

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL TUTOR

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

Bogotá, 29 julio de 2016

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, amiga y ángel María Victoria por brindarme simplemente todo su amor y todo lo mejor de ella.

A mi hermano Carlos Andrés por su constante apoyo y estar conmigo siempre.

A los Ingenieros Carlos Arturo Bohórquez, Héctor Fernando Rojas y Mauricio Sierra Cetina por acompañar y orientar el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros Bryan y Nicolás por su amistad, y fortaleza en momentos difíciles.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	11
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	12
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	12
2.2 BREVE DESCRIPCION DEL PROBLEMA.	12
3. JUSTIFICACIÓN	14
4. OBJETIVOS	15
4.1 GENERAL	15
4.2 ESPECÍFICOS	15
5. MARCO REFERENCIAL.....	16
5.1 MARCO TEÓRICO	16
5.1.1 Definición de acero.	16
5.1.2 Denominación de los aceros.	16
5.1.3 Acero 1045	18
5.1.4 Tratamientos térmicos	19
5.1.5 Transformaciones de fase.	23
5.1.6 Tratamientos intercríticos.....	24
5.1.7 Aceros doble fase.....	25
5.1.8 Designación de aceros doble fase	26
5.1.9 Ecuación Hollomon – Jaffe.	27
5.1.10 Ensayo de dureza	28
5.2 MARCO CONCEPTUAL	32
5.3 ESTADO DEL ARTE	33
5.3.1 Influencia de la temperatura intercrítica.	33
5.3.2 Nuevos campos y aplicaciones.....	34
5.3.3 Variación de propiedades en función del volumen de martensita.	35
5.3.4 Efectos del revenido.	36
5.4 MARCO LEGAL Y NORMATIVO	38
6. DISEÑO METODOLÓGICO	39
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	49
7.1 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE DUREZA.....	49

7.1.1	Dureza revenido 15 minutos de sostenimiento	50
7.1.2	Dureza revenido 30 minutos de sostenimiento	51
7.1.3	Dureza revenido 45 minutos de sostenimiento	51
7.1.4	Dureza revenido 60 minutos de sostenimiento.	51
7.2	METALOGRAFÍAS.....	52
7.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DUREZAS.	53
7.4	RESULTADOS CÁLCULO DEL PARÁMETRO HOLLOMON – JAFFE	54
7.5	CÁLCULO DE DESFASE ENTRE DUREZAS REALES Y TEÓRICAS.....	56
8.	CONCLUSIONES.....	59
9.	RECOMENDACIONES	60
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de interacción de los procesos en los tratamientos térmicos	19
Figura 2: Zona de templado del acero austenización completa	21
Figura 3: Proceso de bonificado (temple + revenido) del acero	22
Figura 4: Diagrama hierro-carbono.	24
Figura 5: Relación esfuerzo vs elongación para diferentes chapas de acero laminadas en caliente, a) y en frío, b).	26
Figura 6: Gráfica de dureza vs parámetro Hollomon – Jaffe.	28
Figura 7: Esquema ensayo de dureza Rockwell	29
Figura 8: Esquema del proceso de ensayo de dureza Brinell.	30
Figura 9: Punta Piramidal de diamante Penetrometro Dureza Vickers	31
Figura 10: Diagrama del proceso de templado acero Sae 1045	44
Figura 11: Fotografía Pulidora Metalográfica Forcipol 1v laboratorio de materiales y tratamientos térmicos - autorizado por la Universidad Libre.	46
Figura 12: Fotografía probeta sobre microscopio Metalográfico marca Olympus de 1000x laboratorio de materiales y tratamientos térmicos – autorizado por la Universidad libre ...	46
Figura 13: Diagrama de proceso de revenido acero 1045	48
Figura 14: Fotografía Durómetro INNOVATEST Nexus 7000 laboratorio de tratamientos térmicos Universidad Libre	48
Figura 15: Microestructura probeta 15 minutos de revenido 1000x	52
Figura 16: Microestructuras probeta 30 minutos de revenido 1000x	52
Figura 17: Microestructuras probeta 45 minutos de revenido 1000x	52
Figura 18: Microestructuras probeta 60 minutos de revenido 1000x	52
Figura 19: Comparación durezas experimentales (reales)	53
Figura 20: Gráfica dureza VS parámetro Hollomon – Jaffe primer tiempo de revenido.	55
Figura 21: Comparación dureza real vs dureza teórica	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Composición química acero 1045	Tabla 2 Propiedades Mecánicas Acero 1045
.....	18
Tabla 3: Ejemplo designación de acero doble fase, familia de aceros HSLA	26
Tabla 4: factores y niveles	41
Tabla 5: Determinación número de repeticiones para los factores de tiempo y temperatura	41
Tabla 6: Curvas de operación característica para el análisis de varianza del modelo con efectos aleatorios	42
Tabla 7: Composición Química acero 1045.....	43
Tabla 8: Temperaturas intercríticas calculadas para el acero 1045.	43
Tabla 9: Esquema proceso de metalografía	46
Tabla 10: Datos dureza de Probeta con revenido a 15 y 30 minutos de sostenimiento.....	49
Tabla 11: Datos dureza de Probeta con revenido a 45 y 60 minutos de sostenimiento.....	50
Tabla 12: Metalografías realizadas probetas I templadas intercríticamente con diferentes tiempos de revenido.....	52
Tabla 13: Resultados cálculo de parámetro P Hollomon – Jaffe.....	54
Tabla 14: Desfase del valor de dureza real y teórico.	56

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Cálculo de temperatura A1	25
Ecuación 2: Cálculo de temperatura A3	25
Ecuación 3: Cálculo de parámetro Hollomon – Jaffe	27
Ecuación 4: Cálculo de dureza Brinell.	29
Ecuación 5: Cálculo de la dureza Vickers	30
Ecuación 6: Cálculo de Parámetro Φ	40

1. INTRODUCCIÓN

Los tratamientos térmicos realizados a temperaturas intercríticas abren un campo nuevo en conformado de materiales llamados aceros doble fase, denominados así por la estructura compuesta por la combinación de propiedades mecánicas difíciles de encontrar, conjuntamente como dureza y ductilidad. Todo este conformado de nuevos materiales va de la mano con su cálculo o modelamiento teórico como valores puntuales de dureza, para así facilitar su obtención para determinadas aplicaciones o industrias.

Para calcular un valor puntual de esta propiedad mecánica, después de un tratamiento térmico se utiliza comúnmente el método de Hollomon – Jaffe, el cual permite conocer la dureza aproximada para un acero sometido a tratamiento térmico en función de su porcentaje de carbono y temperatura a la que fue tratado, este método generalmente va bien para condiciones de austenización completa, por lo que conocer el desfase al tener un caso de tratamiento intercrítico es muy importante para generar confiabilidad en la utilización de este tipo de aceros.

Para realizar esta comparación fue utilizado acero AISI – SAE 1045 el cual se templó a temperatura intercrítica para llegar a su estado bifásico de ferrita y martensita, luego se calculó su dureza teórica con el método de Hollomon Jaffe. Los resultados obtenidos teóricamente fueron comparados con durezas medidas en laboratorio evidenciando la inexactitud en valores puntuales de dureza, demostrando la limitación de este modelo matemático en condiciones de tratamientos térmicos de austenización incompleta.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

La generación de herramientas teóricas que ayuden en la simulación de resultados de dichos materiales y en la predicción de valores puntuales en algunas de sus propiedades, es el estudio realizado por (Sala Serra; Jordi, 2008), titulado “Caracterización y comparación de las propiedades mecánicas de dos chapas de acero avanzado de alta resistencia (AHSS): TRIP800 Y DP800” donde realizan un estudio de las propiedades mecánicas de este tipo de aceros, además desarrolla diferentes ensayos y cálculos que ayudan en la obtención de valores de estas propiedades mecánicas así como modelos teóricos que sirvan en la obtención de curvas de tensión, deformación y dureza.

El contenido de carbono presente en el acero bifásico en la predicción de algunas de sus propiedades mecánicas, lo hace un valioso aporte en la generación de información de este tipo de aceros, en el estudio realizado por (Cárdenas, E et al, 2009), titulado “ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE ACEROS DE DOBLE FASE MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”, se lleva a cabo un estudio micro estructural en diferentes aceros de familia doble fase, y relacionan los diferentes parámetros obtenidos con las propiedades mecánicas de estos aceros, además genera gráficas y modelos que sirven como apoyo en la predicción de dureza y relación del límite elástico en función del contenido de carbono de aceros doble fase.

Un antecedente investigativo muy importante en el esfuerzo por predecir la dureza de este tipo de aceros, es el estudio realizado por (YANZÓN, Rodolfo. et al., 2013), titulado “PREDICCIÓN DE DUREZA EN PIEZAS CONSTRUIDAS CON ACERO TEMPLADO Y REVENIDO”, en el que por medio de ecuaciones polinómicas en la que intervienen factores y variables como el porcentaje de carbono, temperatura de revenido y elementos aleantes, han diseñado un programa informático que genera curvas de predicción de dureza desde el centro hasta la superficie de una probeta de acero.

2.2 BREVE DESCRIPCION DEL PROBLEMA.

La combinación de propiedades mecánicas como dureza y ductilidad ha sido durante años el fin de la ingeniería de materiales y ciencias afines [3] . Un claro ejemplo de este desarrollo, es el acero doble fase, llamado así por la coexistencia de su matriz ferrítica con islas de una segunda fase martensita, microestructuras

culpables de una gran resistencia mecánica combinada con alta capacidad elástica. Para alcanzar estas propiedades se debe llevar el material al campo de $\alpha+\gamma$ del diagrama Fe-C, conocido como zona intercrítica a lo cual se le suman variables como: tiempo de sostenimiento, composición química, tratamiento térmico, dureza, ductilidad etc.[17] Actualmente para el cálculo de la dureza de estos aceros, luego del temple y revenido se emplean expresiones de varios autores teniendo como referencia la temperatura superior A_3 lo que indica un estado de austenización total, la presencia de ferrita en la microestructura de los aceros DP, genera que los valores de dureza teóricos obtenidos por estas expresiones tengan incongruencias con los valores experimentales.[28]

Los aceros de medio porcentaje de carbono son base en la obtención de aceros DP, que a su vez son ampliamente utilizados en la fabricación de piezas estructurales como: chasis, refuerzos, chapas etc., por lo cual obtener un valor preciso de su dureza por los medios teóricos que sean verídicos con lo experimental es indispensable en el desarrollo e implementación de estos aceros en la industria.[43]

La necesidad de la investigación dedicada a la caracterización y desarrollo en aceros doble fase es primordial para generar una base de conocimientos e información que sirva para poder ampliar el campo de su utilización.

3. JUSTIFICACIÓN

Conociendo las dificultades en la obtención de un valor de dureza, empleando las expresiones de algunos autores teniendo como referencia la temperatura, es importante evidenciar el error de estas expresiones dadas para situación de austenización total cuando son aplicadas en condiciones de austenización incompleta, responsable de las incoherencias con resultados experimentales. [30][25]

La dureza del material tratado térmicamente a temperaturas intercríticas fue contrastado con los valores obtenidos mediante la expresión matemática de dureza en función de la temperatura a la que se realiza el revenido, de esta forma se determinó el desfase presente en el método expuesto por el autor. El uso de los datos y la información obtenida en este proyecto amplía la posibilidad de aplicación de este tipo de aceros a nuevos campos. [10]

Este proyecto busca realizar una comparación entre la expresión matemática propuesta por el autor J. H. Hollomon para el cálculo de la dureza en función de la temperatura, basando la investigación en el tratamiento térmico (temple) a temperaturas intercríticas, seguido de un revenido variando la temperatura con diferentes tiempos de sostenimiento. Se calculan las durezas del acero y se comparara los resultados obtenidos de forma experimental con la forma teórica, esperando encontrar la dispersión entre los resultados así como la confiabilidad de esta expresión para la predicción de dureza en aceros doble fase.

4. OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Determinar la influencia de la temperatura de revenido en los valores de dureza de un acero AISI-SAE 1045 templado desde temperaturas intercríticas con relación a la ecuación de J.H.HOLLOMON – JAFFE

4.2 ESPECÍFICOS

- Calcular las temperaturas críticas del acero para realizar el temple basado en su composición química, además de la temperatura de revenido que cumpla con los requerimientos de la expresión propuesta por el autor J. H. Hollomon.
- Elaborar el diseño experimental teniendo en cuenta los factores de tiempo de mantenimiento y temperatura para determinar el número de ensayos necesarios
- Realizar los tratamientos térmicos de temple y revenido a la temperatura y tiempo establecidos en el diseño experimental.
- Correlacionar los valores de dureza hallados mediante la experimentación con los valores arrojados por la expresión matemática del autor.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO TEÓRICO

5.1.1 Definición de acero.

La palabra acero se conoce comúnmente para denominar la unión típica de un metal (hierro) con una pequeña cantidad de carbono, que puede variar normalmente entre el 0.02% y el 2.14%, aunque existen además de otros metales que se pueden añadir en pequeñísima proporción como níquel, titanio, cromo, wolframio o vanadio entre otros, estos aceros especiales se conocen como aceros aleados y la adición de otro metal se realiza para modificar alguna propiedad específica del material.

El acero se caracteriza por su gran resistencia, contrariamente a lo que ocurre con el hierro, que resiste muy poco a la deformación plástica por su composición total con cristales de ferrita; pero cuando se alea con carbono forman estructuras cristalinas diferentes que originan gran incremento en su resistencia. [29]

5.1.2 Denominación de los aceros.

La Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE), fue la primera en crear un sistema para clasificar los aceros guiados por números. Tiempo después el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI) adoptaron un sistema similar. Los números de especificación para el acero son iguales para SAE y AISI diferenciando a AISI en que utiliza los prefijos B, C, D y E para indicar la obtención del acero de la siguiente forma:

- B: Acero Bessemer Ácido al Carbono
- C: Acero Martin – Siemens Básico al Carbono
- D: Acero Martin – Siemens Ácido al Carbono
- E: Acero de Horno Eléctrico

Esta clasificación consta también de 4 números, que nos indica el tipo de acero.

- Primer número: Este número indica el (los) elementos (s) principal (es) de la aleación de acuerdo a lo siguiente:
 1. Acero al Carbono
 2. Acero al Níquel
 3. Acero al Níquel – Cromo
 4. Acero al Molibdeno – Cromo

5. Acero al Cromo
 6. Acero Cromo Vanadio
 7. Acero al Tungsteno
 8. Acero Cromo Níquel Molibdeno
 9. Acero Silicio Manganeso
- Segundo número: Indica el porcentaje aproximado de él o los elementos predominantes de la aleación.
 - Tercer y Cuarto número: Juntos indican la cantidad aproximada de carbono en el acero. [29]

5.1.2.1 Influencia de elementos.

Silicio: Funciona como un elemento desoxidante en aceros al carbono. Debido a que en aplicaciones como soldadura genera formaciones de sílice se recomienda que su contenido en un acero no supere el 0.2%

Azufre: Normalmente es perjudicial debido a que es un elemento insoluble en el hierro, normalmente es una impureza por lo que se mantiene en bajos niveles ya que es responsable de la fragilidad del acero. En algunas condiciones se agrega en mayor cantidad a la habitual con el fin de mejorar la maquinabilidad, aunque esto es, en condiciones especiales.

Manganeso: Es un desoxidante y también desulfurante. Apto para disminuir el contenido de azufre. Facilita la laminación, moldeo y aplicaciones del acero en caliente, además de esto contribuye en propiedades como la resistencia y dureza.

Fósforo: Aumenta la fragilidad de los aceros sobre todo en la ferrita, la martensita y constituyentes del revenido en aceros.

5.1.2.2 Contenido de Carbono

Acero de bajo carbono: Se caracterizan por poseer su contenido de carbono entre 0.10 y 0.30% de carbono, tienen gran capacidad de deformación por lo general contiene entre 0.10% de C y un máximo de 0.40% de Mn, entre sus aplicaciones están partes de carrocerías, alambres y hojalatas.

Acero de medio carbono: Su contenido de carbono se encuentra entre 0.30% y 0.60%, siendo muy usados el AISI-SAE 1045 y 1050, el que tengan un porcentaje

más alto de Mn los hace idóneos para modificar sus propiedades a través de los diversos tratamientos térmicos, entre sus aplicaciones se encuentran, ejes, cigüeñales y engranajes.

Acero de alto carbono: Su contenido varía entre 0.60% y 1.00%, se aplican a piezas con aplicaciones elásticas y alambres de alta resistencia. Aceros de mayor contenido de carbono cuya composición varía entre 1.00% y 2.00% son utilizados en aplicaciones que demandan mayor capacidad elástica.[15]

5.1.3 Acero 1045:

Es un acero de medio carbono, se caracteriza por tener un nivel medio a la resistencia mecánica y tenacidad comparado con aceros de baja aleación. Posee baja soldabilidad y buena maquinabilidad, responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es recomendado para cementación o cianurado. Por su dureza y tenacidad es utilizado para la fabricación de componentes de maquinaria. [1]

Por sus características de temple, composición química, como se muestra en la tabla 1, y propiedades mecánicas, como se muestra en la tabla 2, es utilizado en una amplia gama de aplicaciones automotrices y de maquinaria en general de resistencia media, tales como: ejes, semiejes, cigüeñales, engranajes, piñones, cuñas, tornillos, pernos, martillos, pasadores, remaches, partes de maquinaria y herramientas agrícolas. A continuación se muestra la composición química del acero 1045 tabla y propiedades mecánicas tabla 2.

Tabla 1 Composición química acero 1045 Tabla 2 Propiedades Mecánicas Acero 1045

Composición química (%)	
C	0,43 - 0,50
Mn	0,60 - 0,90
P	0,04 Máx.
S	0,05 Máx.

Propiedades mecánicas	
	Laminado en caliente
Resistencia a la tracción	63 - 73 kgf/mm ²
Límite de fluencia	40 kgf/mm ²
Elongación	16%
Reducción de área	40%
Maquinabilidad	55%
Dureza (HB)	163

Fuente: [1]

5.1.4 Tratamientos térmicos.

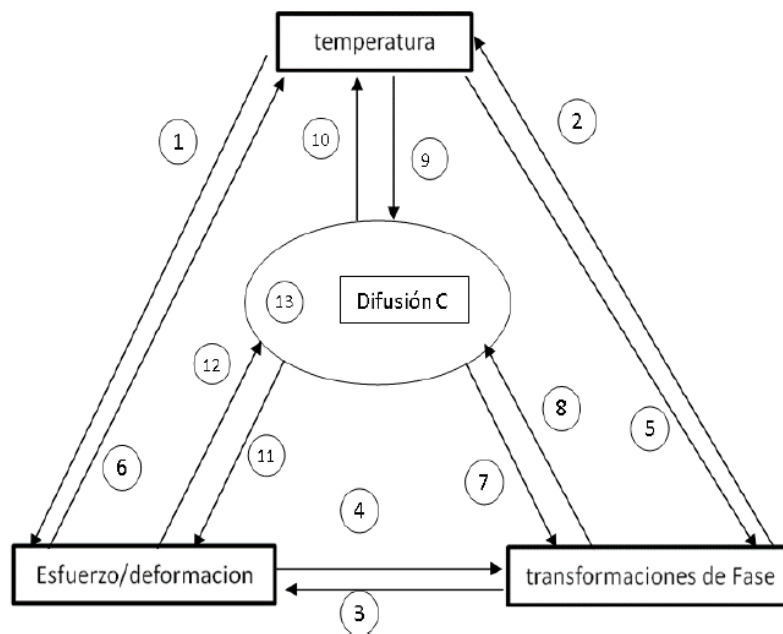
Una de las características del acero, además de sus propiedades mecánicas es la posibilidad de transformar estas propiedades en un gran campo de atributos que cuando se someten a un tratamiento térmico se modifican, que dependiendo de sus requerimientos, mejoran o reducen bruscamente según se desee, aunque paralelamente en el proceso surgen efectos secundarios como la aparición de tensiones y cambios en el tamaño y forma de sus microestructura lo que genera grietas y tensiones, por lo que el control del proceso es primordial en el tratamiento.

Es un paso fundamental en el procesado de acero, metales y fundiciones para alcanzar diferentes combinaciones de propiedades mecánicas, de forma resumida, consiste en calentar y enfriar el material con tiempos en los que se sostiene la temperatura y así modificar la microestructura.

En este proceso se varía el estado del carbono y del hierro, se varía el tamaño del grano y distribución de los constituyentes y cambios dentro del material, como la formación de tensiones generadas durante el proceso, estas últimas dependen en gran parte del medio y temperatura de enfriamiento al que el material es sometido.

A continuación se muestra la relación entre diferentes aspectos que intervienen en el proceso del tratamiento térmico

Figura 1: Esquema de interacción de los procesos en los tratamientos térmicos



Fuente: [27]

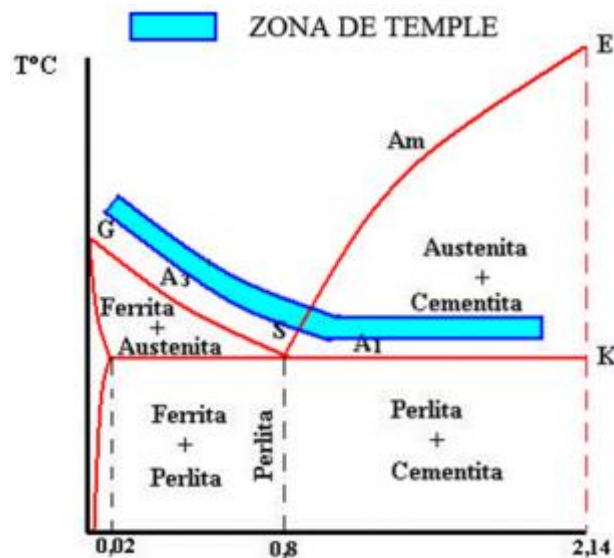
El cambio de temperatura durante el enfriamiento induce un esfuerzo causado por el cambio volumétrico de la transformación de fase ①; la influencia de la temperatura en la transformación de fase resulta en el cambio de la microestructura del material ②; la deformación local producto de este cambio está acompañada de un aumento de los esfuerzos internos ③. La existencia de estos esfuerzos y deformaciones tiene una influencia directa en la cinética de la transformación de fases ④. El calor latente generado debido a que la transformación de fase afecta la distribución de temperatura ⑤. Parte del trabajo realizado por la aparición del esfuerzo se convierte en calor que afecta la temperatura ⑥. Los efectos de la difusión de carbono en la transformación de fases ⑦, se reflejan en dos mecanismos: El primero referido al incremento del porcentaje de C permite realizar la transformación en un rango de temperaturas más bajas; y el segundo tiene que ver con los carburos que se han formado en la superficie del material tratado cuando se presentan elementos aleantes en el acero que exceden los límites de saturación de C en la matriz. La cinética de la difusión y la velocidad de la reacción de la superficie del carbono dependen de la morfología de la microestructura ⑧ y de los niveles de temperatura ⑨. El contenido de C afecta la conductividad térmica del material ⑩. La absorción de átomos de C desde la atmósfera del tratamiento conduce al cambio de parámetros reticulares (lattice), que deben tenerse en cuenta cuando se establecen las ecuaciones constitutivas de las relaciones esfuerzo- deformación ⑪. El efecto que puede tener el estado de esfuerzos en la cinética de la difusión de carbono ⑫ [27]

5.1.4.1 Temple del acero.

Es un tratamiento térmico que consiste en llevar el acero hasta la región de austenita en el diagrama hierro carbono enfriándolo rápidamente, disminuyendo su temperatura en un medio particularmente agua o aceite, generando así un cambio en la estructura de austenita a martensita.

A continuación se muestra gráficamente la zona de templado del acero a austenización completa

Figura 2: Zona de temple del acero austenización completa



Fuente: [13]

El enfriamiento de forma acelerada estando en zona de austenización hasta una temperatura ambiente genera una reestructuración de los microconstituyentes denominado martensita, por lo cual el objetivo del temple se traduce en la obtención de dicha estructura responsable directa del aumento de dureza o fuerza de tenacidad. Este cambio está relacionado de forma directamente proporcional del contenido de carbono del acero, contenido que también determina la disminución de la ductilidad.[39]

Las variables involucradas en el procedimiento de temple son las siguientes:

- Temperatura del temple.
- Tiempo de sostenimiento.
- Velocidad de enfriamiento.
- Composición química del acero
- Medio de enfriamiento.

5.1.4.2 Revenido del acero.

Es un proceso que se aplica al acero que ha sido previamente endurecido (templado), este tratamiento consiste en calentar nuevamente le material por debajo de la temperatura crítica inferior (A1) y posteriormente se enfría a una velocidad adecuada. Este procedimiento se realiza con el fin de aumentar la ductilidad, rebajar la excesiva dureza aumentando el tamaño de grano de la matriz, obtener valores específicos de propiedades mecánicas aliviando tensiones generadas en el material durante el temple y asegurar estabilidad dimensional.

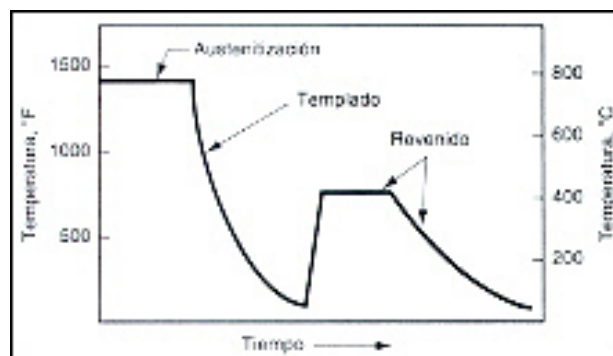
Las variables asociadas con revenido que afectan a la microestructura y las propiedades mecánicas de un acero templado

Incluye:

- Temperatura de revenido
- Tiempo de sostenimiento de la temperatura
- Tasa de enfriamiento de la temperatura de revenido
- Composición del acero, incluyendo el contenido de carbono, contenido de la aleación, y elementos residuales.[4]

A continuación se muestra en la figura 3, el proceso de temple y revenido del acero también llamado bonificado:

Figura 3: Proceso de bonificado (temple + revenido) del acero



Fuente: [36]

La martensita resultante del temple es muy dura y frágil, para lo cual se calienta de nuevo el material a una temperatura inferior a la eutectoide manteniéndola durante un tiempo en específico.

Al calentar por proceso de difusión se consigue la formación de martensita revenida, donde la Martensita generada por el temple sobresaturada de carbono se transforma en martensita revenida compuesta por fase de Ferrita estable y cementita. Esta estructura consiste en partículas muy pequeñas de cementita en una matriz Ferrítica continua y uniformemente dispersa.[41]

A continuación se muestran los diferentes tipos de revenido, estos dependen de las propiedades mecánicas que se quieren para el material:

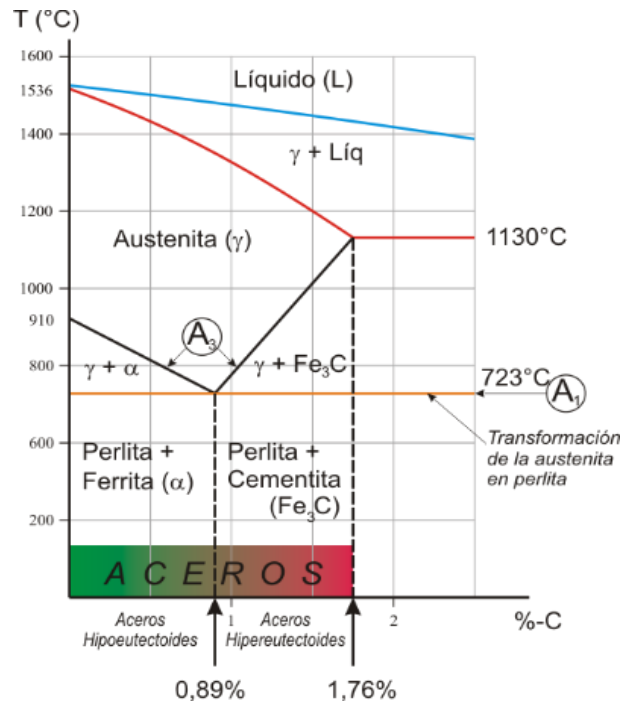
- Revenido bajo: con una temperatura entre 150 y 200°C esta dado para aceros para herramientas con alto porcentaje de carbono, no disminuye considerablemente la dureza pero alivia al igual las tensiones internas.
- Revenido Medio: Con una temperatura entre 350 y 450°C es utilizado en acero para muelles y resortes, disminuye bastante la dureza y aumenta la tenacidad, está dado para acero que necesita dureza pero que a su vez tengan suficiente elasticidad.
- Revenido Alto: Con una temperatura entre 500 y 650°C se utiliza en aceros que necesitan buena resistencia acompañada de buena plasticidad, está dado para condiciones de elevada fatiga y altas cargas de impacto. [13]

Con el revenido se logra aliviar las tensiones dejadas por un tratamiento térmico anterior y dar al material las condiciones finales para las condiciones de trabajo en las que tendrá que trabajar.

5.1.5 Transformaciones de fase.

Temple del acero. Durante los tratamientos térmicos ocurren transformaciones que sufren los aceros al carbono producidos por procesos de difusión, estos cambios o transformaciones se pueden apreciar en la figura 4, el diagrama de fases (Fe- C) o diagrama hierro carbono.[39]

Figura 4: Diagrama hierro-carbono.



Fuente:[42]

Como se explica anteriormente, durante el temple del acero que originalmente presenta una estructura de grano Perlita (Ferrita + Cementita), estructura formada cuando se fabrica acero o hierro fundido y se enfría a una velocidad lenta estable a temperatura ambiente.

Al subir la temperatura por encima de A₃, temperatura a la que normalmente se realiza el temple, se obtiene un reordenamiento de los átomos de hierro y carbono aunque es estable solamente a temperaturas superiores a 900°C conocida como Austenita.

Seguido esto se lleva a cabo un proceso de difusión generado por el enfriamiento rápido para obtener martensita aunque con contenidos de austenita sin transformar que rodea los cristales de martensita, denominada austenita retenida.

5.1.6 Tratamientos intercríticos.

Los tratamientos intercríticos generalmente se utilizan con aceros de bajo y medio carbono, estos aceros se calientan hasta alcanzar la región bifásica del diagrama hierro carbono donde coexisten ferrita y austenita, estas temperaturas se conocen

como temperaturas intercríticas A1 y A3 y dependen de la composición de cada acero.[9]

Para lo cual se pueden calcular con las siguientes ecuaciones 1 y 2 para el cálculo de la temperatura A1 y A3 respectivamente.

Ecuación 1: Cálculo de temperatura A1

$$\begin{aligned} \text{Ac1 } (^{\circ}\text{C}) = & 723 - 7.08 \text{ Mn} + 37.7 \text{ Si} + 18.1 \text{ Cr} + 44.2 \text{ Mo} + 8.95 \text{ Ni} + 50.1 \text{ V} \\ & + 21.7 \text{ Al} + 3.18 \text{ W} + 297 \text{ S} - 830 \text{ N} - 11.5 \text{ C Si} - 14.0 \text{ Mn Si} \\ & - 3.10 \text{ Si Cr} - 57.9 \text{ C Mo} - 15.5 \text{ Mn Mo} - 5.28 \text{ C Ni} - 6.0 \text{ Mn Ni} \\ & + 6.77 \text{ Si Ni} - 0.80 \text{ Cr Ni} - 27.4 \text{ C V} + 30.8 \text{ Mo V} \\ & - 0.84 \text{ Cr}^2 - 3.46 \text{ Mo}^2 - 0.46 \text{ Ni}^2 - 28 \text{ V}^2 \end{aligned}$$

Fuente:[34]

Cuando se realiza en un estado de austenización total la temperatura debe estar por encima de A3 que se calcula de acuerdo con:

Ecuación 2: Cálculo de temperatura A3

$$\begin{aligned} \text{Ac3 } (^{\circ}\text{C}) = & 912 - 370\text{C} - 27.4\text{Mn} + 27.3\text{Si} - 6.35\text{Cr} - 37.2\text{Ni} + 95.2\text{V} + 190\text{Ti} \\ & + 72.0\text{Al} + 64.5\text{Nb} + 5.57\text{W} + 332\text{S} + 276\text{P} + 485\text{N} - 900\text{B} \\ & + 16.2\text{C Mn} + 32.3\text{C Si} + 15.4\text{C Cr} + 48\text{C Ni} + 4.32\text{Si Cr} - 17.3\text{Si Mo} \\ & - 18.6\text{Si Ni} + 4.80 \text{ Mn Ni} + 40.5\text{Mo V} + 174\text{C}^2 + 2.46\text{Mn} - 6.86\text{Si}^2 \\ & + 0.322\text{Cr}^2 + 9.90\text{Mo}^2 + 1.24\text{Ni}^2 + 60.2\text{V}^2 \end{aligned}$$

Fuente:[18]

5.1.7 Aceros doble fase.

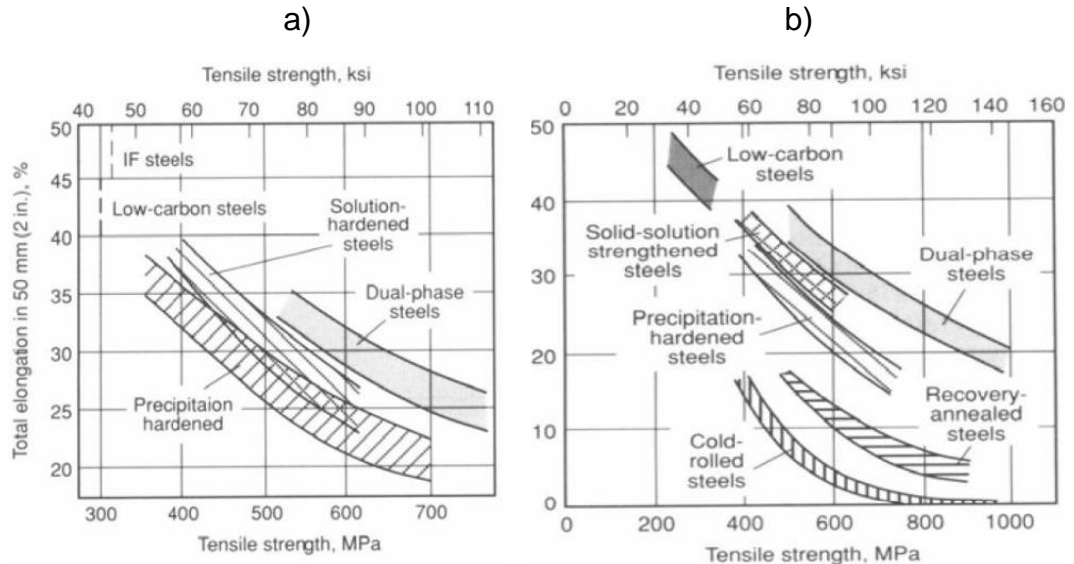
El término acero doble fase o dual phase (dp) se aplica a los acero normalmente de bajo y medio carbono después de aplicar un tratamiento térmico comprendido en temperaturas intercríticas, generando al enfriar una matriz fina que aporta gran formalidad en la que existen pequeñas islas de martensita que le aportan una extraordinaria dureza.[35]

Son aceros cuya composición está formada por matriz ferrítica con un rango entre 70 % – 90 %, la cual contiene entre 10 % y 30 % de martensita dispersa, esta combinación genera propiedades como baja resistencia a la fluencia, buena dureza y alta ductilidad, cualidades por lo que han recibido gran atención ya que

son muy favorables en productor terminados gracias a su rápida tasa de deformación.

En la figura 5 se muestra la comparación de la ductilidad y resistencia a la fluencia con otros aceros de la misma familia HSLA:

Figura 5: Relación esfuerzo vs elongación para diferentes chapas de acero laminadas en caliente, a) y en frío, b).



Fuente: [6]

5.1.8 Designación de aceros doble fase

Los aceros doble fase tienen una designación que a su vez referencia los valores de límite elástico y límite de rotura, generalmente en unidades de N/mm^2 , además del tipo de acero ya esta designación la comparte la familia de aceros de alta resistencia. [15]

A continuación en la tabla 3 se muestra un ejemplo con la designación del acero doble fase DP 500/800:

Tabla 3: Ejemplo designación de acero doble fase, familia de aceros HSLA

DP	500	800
Tipo de acero en este caso DP (Dual Phase)	Límite elástico	Límite a la rotura

Fuente: Autor del Proyecto.

5.1.9 Ecuación Hollomon – Jaffe.

La ecuación de Hollomon – Jaffe expuesta por primera vez en 1947 en el libro “FERROUS METALLURGICAL DESIGN” es un parámetro el cual ha servido de guía en la obtención, predicción y comportamiento de la dureza de un acero, antes o después de un tratamiento térmico a partir de las variables involucradas en el proceso de tiempo y temperatura.

La ecuación que permite la obtención de la dureza en función de la temperatura de revenido se muestra a continuación en la ecuación 3:

Ecuación 3: Cálculo de parámetro Hollomon – Jaffe

$$H = T(C + \text{Log}t)$$

Fuente: [24]

Donde:

T: Temperatura en grados Kelvin.

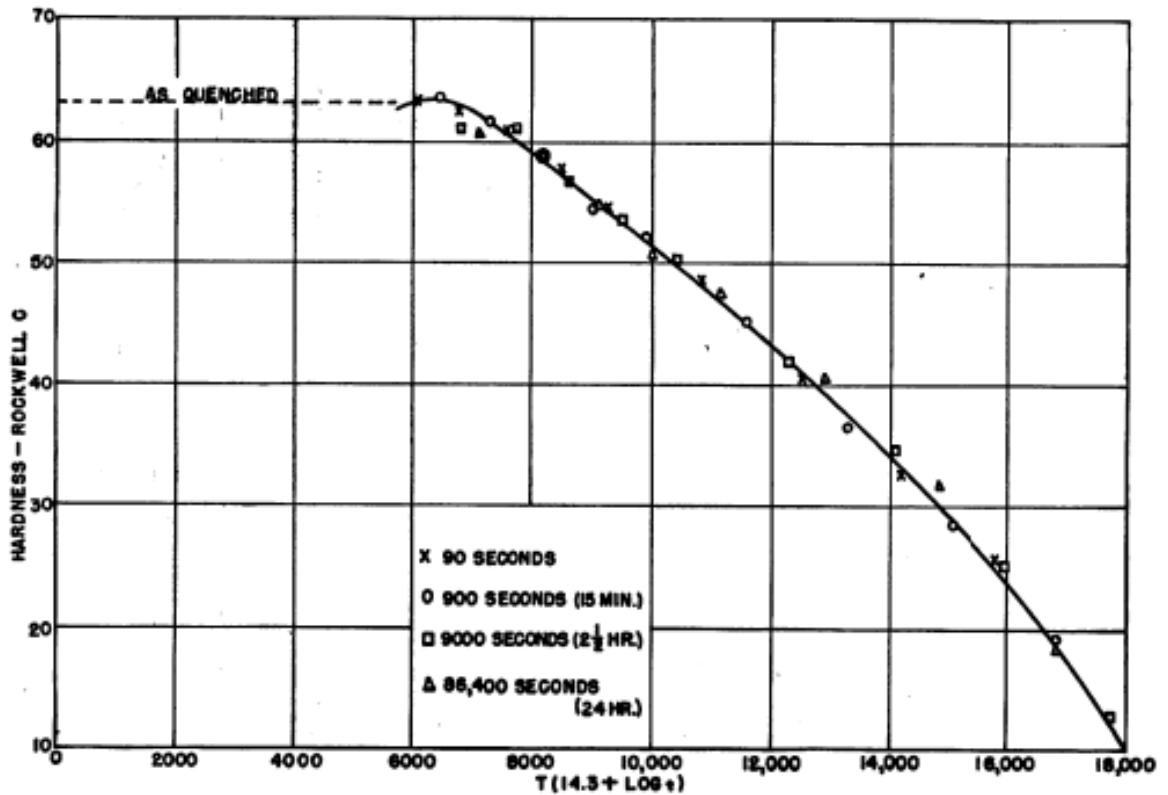
C: Constante 14.3 para aceros de medio carbono.

t: Tiempo en segundos

Los valores de dureza que se hallan con esta ecuación propuesta por estos autores es muy conocida por su alta fiabilidad y bajas desigualdades con valores reales, aunque se ve limitada cuando los tratamientos térmicos no se llevan a una temperatura superior a la intercrítica A3, lo que quiere decir que está definida o diseñada para el cálculo de dureza en condiciones de austenización completa.[24]

Una vez calculado el parámetro Hollomon – Jaffe, en la figura 6 se procede a encontrar el valor de dureza en escala Rockwell C, correspondiente para dicho valor.

Figura 6: Gráfica de dureza vs parámetro Hollomon – Jaffe



Fuente: [24]

5.1.10 Ensayo de dureza

Con el ensayo de dureza se mide la resistencia del acero a la deformación, o esfuerzos de contacto generados por la interacción con objetos más duros.

Existen diferentes tipos de ensayo para determinar la dureza, cada uno difiere respecto a la forma de ensayo, tipo de penetrador y fuerza aplicada.

5.1.10.1 Ensayo Rockwell

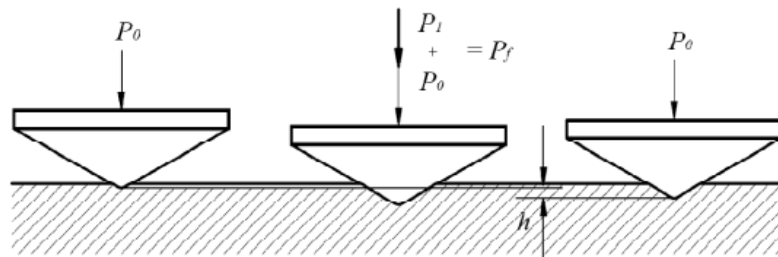
Este ensayo utiliza un penetrador con forma cónica, se caracteriza por que aplica dos cargas, la primera o precarga genera un punto de referencia a partir del cual

aplica la mayor carga para generar penetración, este tiene la ventaja de ser muy preciso ya que evita el efecto de reacción en la medición y el usar la precarga permite atravesar la rugosidad de la superficie. [5]

Actualmente se encuentra equipos digitales para la medición de dureza en escala rockwell los cuales son más precisos y facilitan la forma de realizar el ensayo.

A continuación, en la figura 7 se muestra el esquema de penetración del penetrador en dureza Rockwell:

Figura 7: Esquema ensayo de dureza Rockwell



Fuente: [11]

5.1.10.2 Ensayo Brinell

Este ensayo utiliza un penetrador con punta esférica en carburo de tungsteno, este aplica una carga que oscila entre 500 y 3000 Kgf durante un tiempo estimado donde penetra la superficie del material.[5]

En este ensayo se debe medir la huella hecha por el penetrador con un microscopio para determinar la dureza del material. La dureza Brinell se puede determinar mediante la ecuación 4 que se presenta a continuación:

Ecuación 4: Cálculo de dureza Brinell.

$$HB = \frac{2F}{\pi * D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

Fuente: [5]

Dónde:

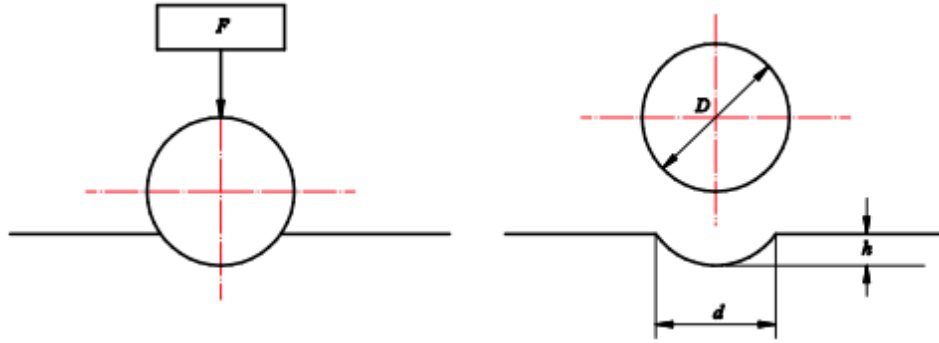
F=Carga en Kgf.

D=Diámetro de la esfera en mm o in.

d=Diámetro de la penetración en mm o in.

En la figura 8, se muestra el proceso de penetración y variables del ensayo de dureza Brinell.

Figura 8: Esquema del proceso de ensayo de dureza Brinell.



Fuente: [11]

5.1.10.3 Ensayo Vickers.

Este ensayo utiliza un penetrador de punta piramidal de diamante para penetrar la superficie del material con una fuerza que va hasta 120 Kgf, para determinar la dureza se miden las diagonales de la punta piramidal registrada en la superficie y se calcula su promedio.

La dureza Vickers se puede determinar mediante la ecuación 5:

Ecuación 5: Cálculo de la dureza Vickers

$$HV = \frac{2 P \sin \theta}{d^2}$$

Fuente: [5]

Dónde:

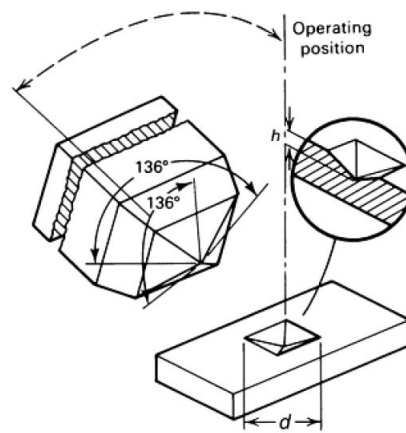
P= Carga en Kgf

d=Longitud de la agujero.

Φ =Angulo de la superficie de la punta de diamante.

En la figura 9, se muestra la punta en forma piramidal del Penetrómetro usado en el ensayo de dureza Vickers:

Figura 9: Punta Piramidal de diamante Penetrómetro Dureza Vickers



Fuente: [5]

5.2 MARCO CONCEPTUAL

- **Diagrama hierro carbono:** Se conoce como la representación gráfica de la transformación del acero con la temperatura, en él se muestran todos los constituyentes del acero.[30]
- **Ferrita:** Conocido como hierro α , es el constituyente del acero más blando, dúctil y maleable y propiedades ferromagnéticas hasta los 770°C.[39]
- **Cementita:** Es un constituyente más duro del acero con una dureza de 68 HRC, es frágil, de alargamiento nulo y poca resiliencia. [30]
- **Austenita:** Es un constituyente del acero, se caracteriza por ser dúctil, tenaz y con una elevada resistencia al desgaste. [30]
- **Perlita:** Es una microestructura formada por capas o laminillas de ferrita y Cementita. Sus propiedades mecánicas dependes de la finura de estas laminillas y de la velocidad de enfriamiento del tratamiento térmico.[30]
- **Difusión:** Es un proceso de transformación en la cual los átomos para reordenarse se mueven al azar y en forma más o menos desordenada, para poder reagruparse en la distribución de la nueva estructura.[30]
- **Mufla:** Es un horno utilizado generalmente en la fundición de metales y cocción de materiales cerámicos, para lo cual utiliza energía térmica.[33]
- **Bainita:** Es un constituyente del acero que se obtiene de la mezcla de fases de ferrita y Cementita, composición está en función de la temperatura y se caracteriza por ser resistente a la fatiga y al desgaste por rodadura.[30]
- **Dureza:** Es la propiedad del acero de oponer resistencia a la deformación, destrucción u esfuerzos de contacto generados por otro cuerpo.[33]
- **Metalografía:** Es la ciencia que tiene como fin estudiar la constitución interna de los metales y sus aleaciones, y las relaciona con su composición y propiedades mecánicas. [33]

5.3 ESTADO DEL ARTE

5.3.1 Influencia de la temperatura intercrítica.

A menudo el revenido se utiliza para reducir tensiones internas, mejorar propiedades como la dureza, ductilidad y dar una mejor estabilidad en su microestructura producto de un tratamiento térmico anterior como el temple. Como la temperatura a la que se realiza el temple tiene relación directa con estos fenómenos, en 2011 fue desarrollada una investigación por (ANAZADEH ZAYED, A. Y KHEIRANDISH. Sh) Titulada “Affect of the tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of dual phase steels”, en esta investigación se tomó como muestra probetas de acero al carbono al que se le realizó un recocido intercrítico en el que se obtuvo 31% martensita, póstumo se continuó con un revenido a temperatura que variaron entre 200°C y 300°C a un hora. Como conclusión se relacionó que a temperatura inferior a 300°C con un tiempo de sostenimiento de 60 minutos resultó adecuada para obtener mejores valores de resistencia a la fluencia y ductilidad, además con este tiempo también disminuye la diferencia de la dureza entre las dos fases presentes (ferrita-martensita).[2]

Los aceros doble fase se caracterizan por la coexistencia de fases (ferrita martensita) resultado de un tratamiento térmico a temperatura intercrítica. Por ello la morfología, fracción de volumen de martensita determina las propiedades mecánicas de estos aceros. Debido a esto en 2014 un estudio realizado por (GHAERI, Ali; SHAFYEI, Ail Y HONARMAND, Mehrdad.), titulado “*Effects of Inter-critical Temperatures on Martensite Morphology, Volume Fraction and Mechanical Properties of Dual-Phase Steels obtained from Direct and Continuous Annealing Cycles*”, en el cual se experimentó con un acero de bajo carbono al manganeso al que se le realizó un tratamiento térmico intercrítico entre 725°C y 800°C, variando los intervalos de temperatura dentro de estos límites para encontrar la temperatura de transición frágil-dúctil (DBTT). Los resultados muestran una mejor morfología temperaturas más cercanas a A1 y mejores propiedades como resistencia al impacto y flexibilidad, producto de una fase mayoritaria de ferrita más resistente gracias a la presencia de martensita en una menor medida.[19]

Un aspecto importante en la dureza de un acero doble fase es la temperatura a la cual se realiza el tratamiento térmico, ya que influye de una forma muy directa en la fracción de martensita que se formará, por ello en 2014 un estudio de (KUANG, C.F et al) titulado, “*Effects of quenching and tempering on the microstructure and bake hardening behavior of ferrite and dual phase steels*”, en este estudio se analizó la evolución de la microestructura y dureza (HB) así como el

comportamiento de la ferrita en aceros doble fase. Para esto se experimentó con aceros C-Mn al que se realizó un temple en agua a temperatura intercrítica y un revenido en un rango de temperatura de 100°C a 500°C, posteriormente se analizó el alivio de tensiones de ferrita y la precipitación de carburos tanto en ferrita como en martensita y la disolución de carburos de ferrita. Como conclusión se obtuvo que la dureza cambie de forma proporcional directa a la temperatura de revenido así como el alivio de tensiones y la disolución de carburos de ferrita.[26]

El efecto del tratamiento térmico intercrítico que se utiliza así como la temperatura a la cual se realiza pueden influir en las propiedades finales del acero doble fase. Por ello en 2010 una investigación realizada por (HUSEYIN, Aydin; ZEYTIN HAVVA, Kazdal y CEYLAN, Kubilay) titulada, *“Effect of Intercritical Annealing Parameters on Dual Phase Behavior of Commercial Low-Alloyed Steels”*, esta investigación utiliza acero de baja aleación con un contenido de carbón bajo, y lo somete a tratamiento térmico de recocido intercrítico el cual luego pasa a laminación en frío. Para el desarrollo se estudiaron factores como la velocidad de calentamiento, temperatura de remojo, tiempo de remojo. Los resultados obtenidos mostraron que la resistencia a la fluencia y resistencia a la tracción última aumentó proporcional con forma a la temperatura intercrítica y velocidad de enfriamiento producto del aumento de volumen de martensita dada estas condiciones.[21]

Los efectos del tratamiento térmico a temperaturas intercríticas son muy diversos los cuales están en función de la temperatura intercrítica a la cual se realiza el tratamiento. Por ello en 2012 en un estudio realizado por (BOHÓRQUEZ, Carlos A.) titulado, *“INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO SAE 1045”*, en el cual se experimenta con probetas de acero AISI-SAE 1045, este se temple en agua seleccionando cuatro temperaturas en el rango intercrítico. Los resultados obtenidos evidencian la relación de la temperatura del tratamiento con la variación de ferrita y martensita presente en la microestructura que influyen en las propiedades mecánicas del acero[10]

5.3.2 Nuevos campos y aplicaciones.

Propiedades como resistencia a la tracción, resistencia al impacto y la flexibilidad son responsables del auge de los acero doble fase en industrias como la automovilística o marítima, desplazando aceros más tradicionales en esta industria. En 2011 un estudio realizado por (HAYAT, Fatih y UZUN, Huseyin) titulado, *“Effect of Heat Treatment on Microstructure Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Ship and Dual Phase Steels”*, en el cual se compararon

varios aceros DH 36 (acero naval) con diferentes composiciones químicas, con aceros doble fase con diferentes fracciones de martensita. Para determinar un mejor material se realizaron pruebas de microestructura, tracción, impacto y micro dureza. Como resultado se encontraron valores más elevados hasta de 3 veces la resistencia a la tracción del agua del acero doble fase sobre el acero naval, evidenciando las buenas propiedades de este tipo de acero gracias a su fracción de martensita que eleva los valores de dureza y resistencia sin la pérdida de ductilidad y flexibilidad.[20]

El tratamiento térmico intercrítico genera fases de martensita y ferrita generadora de buen equilibrio de propiedades. La estabilidad a altas temperaturas lo incorpora a nuevos campos como en plantas de energía nuclear. Debido a esto en 2013 en un estudio realizado por (SANGHOON, Noh. et al.), titulado “*EFFECTS OF HEAT TREATMENTS ON MICROSTRUCTURES AND MECHANICAL PROPERTIES OF DUAL PHASE ODS STEELS FOR HIGH TEMPERATURE STRENGTH*”, en el cual se experimentó con aceros con Cr, W y Ni, fabricados por aleación mecánica y un proceso de prensado isostático en caliente, seguido de un tratamiento térmico a temperatura intercrítica. El estudio reveló que la adición de aleantes mejoran su resistencia a condiciones de alta temperatura, además que la combinación de granos de ferrita y nano partículas de óxido pueden ser cambiados por el tratamiento térmico lo cual afecta significativamente los puntos fuertes de resistencia a la elevada temperatura.[38]

Los aceros doble fase son parte de la familia de aceros de alta resistencia (AHSS), gracias a sus propiedades de resistencia, ductilidad y gran capacidad de absorber energía, dada su matriz ferrítica y fracciones que pueden variar desde 5 – 50% de martensita. Estas características generan que se incorpore a nuevos campos, por ello en 2011 en un estudio realizado por (LORUSSO, H. et al.) titulado, “*Application of dual phase steels in wires for reinforcement of concrete structures*”, en el cual se experimentó con varios grados de acero doble fase a partir de acero bajo- medio carbono, variando el porcentaje de martensita y luego se endurecieron ligeramente por deformación en frío. El estudio reveló un coeficiente de alargamiento más alto, así como la dureza y un valor de resistencia a la tracción superior, estas características cumplen a cabalidad la norma de desarrollo establecida para este

Tipo de aplicaciones así como las expectativas de la comunidad científica.[28]

5.3.3 Variación de propiedades en función del volumen de martensita.

La variación de propiedades mecánicas como la dureza, varían con los porcentajes en volumen de martensita que a su vez está relacionada con la composición química y cantidad de carbono. Por ello en 2012 un estudio realizado por (ARISTIZABAL, R.; FOLEY, R Y DRUSCHITZ, A., 2012) titulado,

“INTERCRITICALLY AUSTENITIZED QUENCHED AND TEMPERED DUCTILE IRON”, en el cual se analizan acero doble fase con diferente composición química y porcentaje de martensita formada por austenización intercrítica. El material fue revenido a 400°C y 500°C durante una hora. Los resultados indicaron que el carbono para formar austenita viene principalmente del existente en la matriz y que el proporcionado por elementos sustitutivos es limitado. Como conclusión también muestra que el límite elástico y la dureza, aumentaron y la ductilidad disminuyó a medida que aumenta el volumen de martensita.[3]

La fracción volumétrica de martensita es la que determina ciertas propiedades en los aceros. Pero a la vez esta fracción está relacionada a la temperatura intercrítica a la que se somete el acero doble fase. En 2009 en un estudio realizado por (MOVAHED, P. et al.) Titulado, *“The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite–martensite dual phase steel sheets”*, en el cual se analizaron chapas de acero doble fase producto del tratamiento intercrítico y se analizó el volumen de martensita en función de la temperatura intercrítica además de las propiedades mecánicas. Como conclusión se obtuvo que a una temperatura más cercana a A3 aumenta el volumen de martensita, aunque las mejores propiedades o propiedades más equilibradas como dureza-ductilidad están dadas por un porcentaje igual de ferrita –martensita al igual que la resistencia a la tracción, ductilidad están relacionadas inversamente a la temperatura de austenización.[31]

El carbón contenido en un acero, determina sus propiedades mecánicas y microestructura. Un elevado porcentaje de carbono afecta el nivel de martensita y templabilidad del material. Por ello en 2013 en una investigación realizada por (DE LA CONCEPCION, Valeria; LORUSSO, Hernán y SVODOBA, Hernán) titulada, *“Effect of carbon content on microstructure and mechanical properties of dual phase steels”*, en la cual experimenta con aceros doble fase de distinto porcentaje de carbón producto del tratamiento térmico a temperatura intercrítica, realiza una caracterización microestructura, micro dureza, ensayo de tracción. Los autores llegaron a la conclusión que el contenido de carbono incrementa la fracción martensita, aunque la mejor combinación de propiedades mecánicas está dada para aceros de bajo-medio carbono y 50% de martensita ya que genera mayor estabilidad de fases, tamaños de grano y tensión entre fases.[14]

5.3.4 Efectos del revenido.

Propiedades mecánicas como la conformabilidad pueden llegar a ser un poco bajas en comparación con otras clases de acero como aceros de fase compleja (CP), por ello en 2012 un estudio realizado por (KAMPA, A.; CELOTTOB, S Y HANLONB, D.N) titulado, *“Effects of tempering on the mechanical properties of high strength dual-phase steels”*, en el cual se describe el efecto que tiene reducir

a breves minutos el temple y como incide en las propiedades mecánicas de los aceros doble fase rolados en caliente o en frío y galvanizados. Para ello se evaluó características como tracción uniaxial y capacidad de flexión después de revenido a 200 y 400°C durante un tiempo no mayor a 10 minutos. Como resultado se obtuvo que cambiando los tiempos de revenido, haciéndolos más cortos conduce a una disminución en la elongación, a la tracción y un aumento en la expansividad y capacidad de flexión. Todo esto gracias a la precipitación de carburos de martensita y ferrita.[25]

Un modelo de predicción de dureza eficiente en un acero es muy importante y necesario para el control de parámetro de fabricación del mismo así como de mantener las propiedades mecánicas consistentes. Por ello en 2012 en un estudio realizado por (MUKHERJEE, Monideepa; DUTTA, Chaitali Y ,HALDAR, Arunansu), titulado, "*Prediction of hardness of the tempered martensitic rim of TMT rebars*", en el cual se experimenta con barras de acero con fase de ferrita- perlita en el centro y un borde de martensita. Como resultado se desarrolló un modelo o matemático para el cálculo de la dureza de martensita en función de la composición química y parámetros no isotérmicos de revenido, encontrando un error no muy grande entre la dureza real y la proporcionada por este método.[32]

En el proceso de diseño y selección de acero es indispensable conocer los valores puntuales de sus propiedades mecánicas. En la práctica es común encontrar aceros que después de un bonificado (temple +revenido) que el valor de su dureza con es acorde con el valor calculado con expresiones matemáticas. Es por ello que en 2013 en un estudio realizado por (YANZÓN, Rodolfo. et al.), titulado "*PREDICCIÓN DE LA DUREZA DE UN ACERO REVENIDO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA COMPOSICIÓN QUÍMICA*", en la que se experimentó con varias probetas de acero de medio carbón a las que se les realizó un bonificado templando a una temperatura superior A3 y en revenido desde los 205 a 705°C. Como conclusión se encontró que las expresiones matemáticas utilizadas en este estudio contrastando con los datos obtenidos experimentalmente no proporcionan un error mayor al 5% generando confiabilidad en los valores obtenidos por el método teórico.[43]

Con el propósito de minimizar los costes derivados de la realización de ensayos experimentales, se han desarrollado diversos métodos, que permiten predecir, mediante cálculo, las propiedades y el comportamiento de esos aceros en los tratamientos térmicos. Un ejemplo claro que pone a prueba este tipo de métodos se expone en un estudio realizado en 2005 por (TARÍN, P.; SALAMANCA, A. Y PÉREZ, J.), titulado, "*Comprobación experimental de métodos de cálculo de propiedades obtenibles mediante temple y revenido, en aceros de baja aleación*", en el cual se templaron probetas de acero al carbono de baja aleación a una temperatura superior a A3 con lo cual en experimentos previos se obtuvo una austenización completa y correcta. Luego se realizó un revenido a 400°C y se

procedió a obtener dureza tanto experimental como teórica. Como conclusión se obtuvo que en condiciones de austenización total, los métodos trabajados en este estudio son muy aproximados a los datos obtenidos realmente y que difiere muy poco un método de otro, pero sí se evidencia que para ciertas temperaturas y bajo ciertos parámetros algunos son más exactos que otros.[40]

5.4 MARCO LEGAL Y NORMATIVO

- **Norma Técnica Colombiana (NTC) 1486**, Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación.[22]

Esta norma establece lineamientos y estándares que se deben seguir en la documentación, etapas del proceso y además información en la elaboración de tesis, monografías y otras formas de trabajos de investigación.

- **ASTM 1997 Standard Test Methods for Vickers Hardness of Metallic Materials; designation E92-82.**[23]

Estos métodos de ensayo cubren la determinación de la dureza Vickers de materiales metálicos, Usando fuerzas aplicadas de 1Kgf a 120 Kgf.

- **ASTM E18-98 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.**

Esta norma establece los lineamientos a seguir para la toma de dureza Rockwell en sus respectivas unidades (pulgada-libra), en ella se encuentra toda la información para la estandarización de los penetradores así como la normalización de los bloques de prueba Rockwell. [8]

- **ASTM E10 Standard Test Method for Brinell hardness of Metallic Materials.**

Esta norma establece los lineamientos para la toma de dureza Brinell a materiales metálicos, la cual es muy útil ya que se puede relacionar con su resistencia a la tensión, resistencia al desgaste y ductilidad. [7]

- **ASTM E3-95 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.**

Esta norma presenta la orientación necesaria para realizar un examen metalográfico con el fin de revelar y corroborar la estructura de los metales y aleaciones.[4]

6. DISEÑO METODOLÓGICO

- **Fase 1.** Consulta de investigaciones previas relacionadas.

Como primer paso se realiza una búsqueda acerca de investigaciones realizadas con aceros doble fase, su caracterización, aplicaciones y métodos utilizados para el cálculo de la dureza y propiedades mecánicas adquiridas una vez realizados los tratamientos térmicos. Para eso nos referimos de toda información referente en bases de datos e internet.

- **Fase 2.** Delimitación de factores relacionados al proyecto.

Selección del acero:

Para el desarrollo del proyecto se escoge un acero de medio carbono sin elementos aleantes, puesto que es un acero muy versátil gracias a su combinación de propiedades, dureza y ductilidad en estado doble fase, y dadas las investigaciones es un acero que ha tenido diversidad de nuevas aplicaciones dentro de la industria automovilística, marítima y estructural.

Cálculo de la temperatura intercrítica y tiempos de revenido:

La temperatura intercrítica escogida determinará las propiedades finales del material, una estabilidad de fases tanto de martensita como de ferrita en igual proporción, será determinante para analizar y calcular la dureza adquirida por este acero en dichas condiciones, y el revenido asegurará que con este tiempo no tenga un cambio relevante tanto en la dureza como en la ductilidad.

Cálculo de la dureza:

El método de Hollomon – Jaffe está dado para condiciones de austenización completa, que es precisamente lo que se quiere analizar, además que es un modelo muy utilizado en la predicción de dureza en función de la temperatura de revenido.

- **Fase 3.** Diseño Experimental

Para la debida ejecución y desarrollo del proyecto es necesario la implementación de un modelo experimental para determinar la cantidad de material necesario con el fin de:

- Aumentar la precisión y validez del experimento
- Determinar el número de datos (corridas).
- Proveer un estimado del error experimental, tal estimación se convierte en la unidad básica para determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente significativas.

Se seleccionó un diseño experimental dos factores, el primer factor seleccionado (factor a) es el tiempo, debido a que es una variable de análisis en el desarrollo del proyecto, teniendo como un segundo factor (factor b) la temperatura a la cual se realizará el revenido, la cual es la otra variable de análisis.

Para determinar el número de repeticiones usamos la ecuación 6 para el cálculo del parámetro Φ .

Ecuación 6: Cálculo de Parámetro Φ

$$\Phi^2 = \frac{nbD^2}{2a\sigma^2}$$

Fuente: [16]

Donde:

- n=Número de replicas
- a= Número de niveles factor (a)
- b= Número de niveles factor (b)
- D= Diferencia de las medias
- σ = Desviación estándar

El valor de “n” es escogido según que factor de sensibilidad que requiera el diseño.

El número de niveles del factor “a” para el denominador en este caso el tiempo, corresponde a 4, y el número de niveles del factor “b” para el numerador que corresponde a la temperatura es igual a 2. La tabla 4, muestra los diferentes niveles de tiempo y temperatura utilizados en el diseño experimental.

Tabla 4: factores y niveles propuestos de la investigación

		Factor (b) Temperatura de revenido en grados Celsius °C	
Factor (a) Tiempo en minutos numero niveles	15	500	550
	30	500	550
	45	500	550
	60	500	550
4		2	

Fuente: Autor del proyecto.

Al reemplazar los valores en la ecuación matemática 6, suponiendo un valor oscilatorio para n empezando en este caso desde 2 obtenemos un valor establecido para Φ con lo cual podemos recopilar en la tabla 5, numero de repeticiones y valor de cada factor.

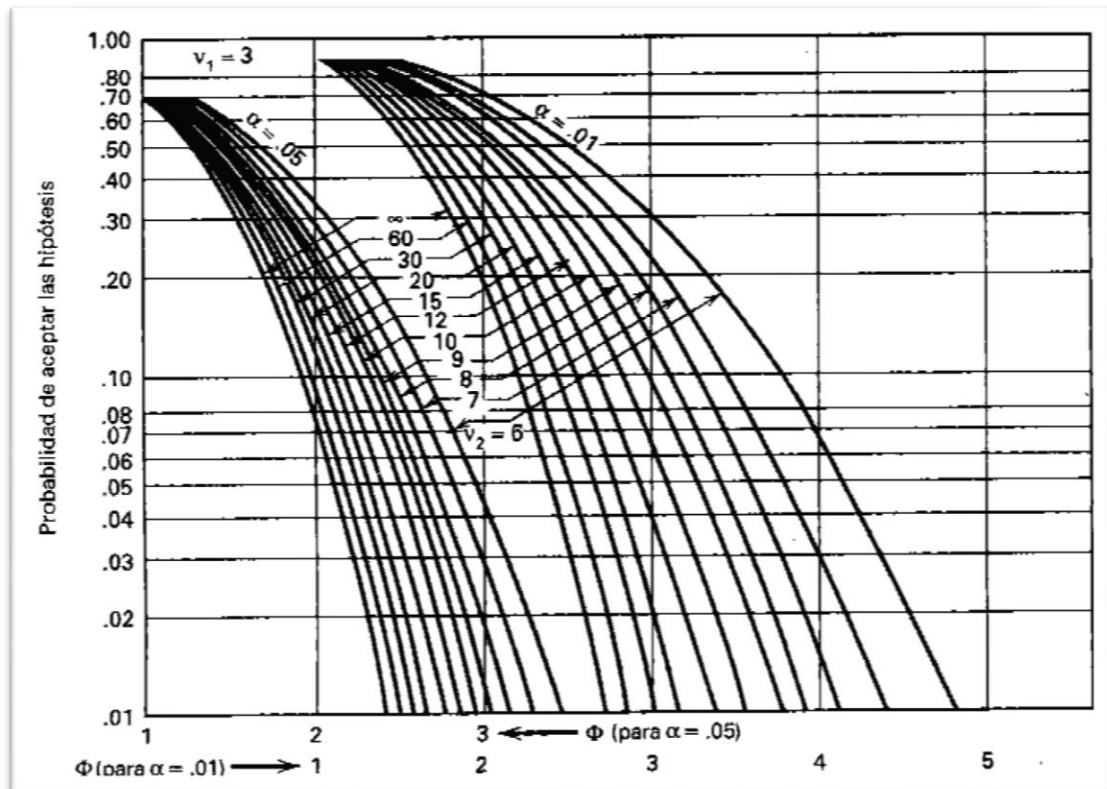
Tabla 5: Determinación número de repeticiones para los factores de tiempo y temperatura

n	ϕ^2	ϕ	a	b	σ	σ^2	D	v1=a-1	v2=ab(n-1)	β	poder (1-B)*100%
2	4,5	2,121	4	2	36,7	1349,828	110	3	8	0,3	70
3	6,8	2,598	4	2	36,7	1349,828	110	3	16	0,050	95
4	9	3,000	4	2	36,7	1349,828	110	3	24	0,01	99

Fuente: Autor del proyecto.

Como paso seguido por medio de las curvas de operación características, se determina el valor del error β (error del sistema) en función del número de repeticiones; este ejercicio se realiza con el fin de que el error tienda a cero para tener una confiabilidad alta. Este proceso se puede encontrar en la tabla 6:

Tabla 6: Curvas de operación característica para el análisis de varianza del modelo con efectos aleatorios



Fuente: [16]

Se deben realizar 4 repeticiones del experimento para cada temperatura para alcanzar una confiabilidad del 99% y con una probabilidad de rechazar la hipótesis de $\alpha=0,01$

En total serian 32 experimentos para relacionarlos con los niveles propuestos.

- **Fase 4.** Elaboración probetas de acero AISI-SAE 1045.

Al contar con un total de probetas para el diseño experimental se calcula el total de material a comprar allí mismo se realiza el corte, el acondicionamiento de las

probetas para los tratamientos térmicos se realiza en el laboratorio de tratamientos térmicos de la universidad libre.

La totalidad del material se prepara para temprar a una sola temperatura, pero antes se divide en cuatro grupos de 8 probetas con la designación A, B, C y D para el revenido posterior a 15, 30, 45 y 60 minutos respectivamente.

- **Fase 5.** Calculo de tiempos y temperaturas de los TT.

Para poder determinar las temperaturas intercríticas del material, se realizó una composición química del material ya que cada temperatura intercrítica A1 y A3 están en función de estos valores.

Se realizaron 3 quemas por espectrometría de emisión, realizado en conjunto por laboratorios del Sena generando los siguientes resultados mostrados en la tabla 7:

Tabla 7: Composición Química acero 1045

Fe%	C%	Mn%	P%	S%	Si%	Cu%	Ni%	Cr%	Pb%
97,96	0.456	0,549	0,008	0,003	0,218	0,012	0,013	0,317	0,005
V%	Mo%	W%	Co%	Ti%	Sn%	Al%	Nb%	B%	Mg%
0,003	0,017	0	0,007	0,002	0	0,092	0	0	0

Fuente: Autor del Proyecto

Una vez se tiene la composición química real de las probetas de acero AISI-SAE 1045, las temperaturas calculadas A1 y A3 se realizan con las ecuaciones 1 y 2 respectivamente, ecuaciones anteriormente mostradas en el marco teórico.

A continuación se muestra en la tabla 8, los resultados de las temperaturas críticas calculadas:

Tabla 8: Temperaturas intercríticas calculadas para el acero 1045.

Ac1	Ac3
732	784

Fuente: Autor del proyecto

La temperatura a la que se realiza el temple es a 760°C ya que a esta temperatura para este tipo de acero se formará una microestructura compuesta de martensita

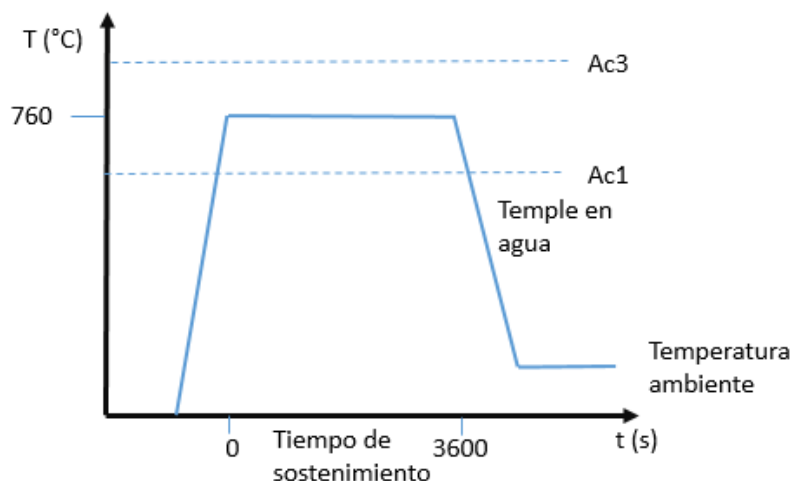
para el aumento de dureza, en matriz ferrítica aportante de la característica ductilidad del acero doble fase, esto lo conocemos gracias a la investigación previa realizada, además está perfectamente dentro del rango de temperaturas críticas calculadas.

La microestructura buscada después de templado el material, es una fracción de martensita entre el 60% y 70 % tomando como referencia el estudio realizado por (Bohorquez, Carlos et al), titulado “CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO AISI/SAE 1045 TRATADO TÉRMICAMENTE EN EL INTERVALO INTERCRÍTICO”, tomando un tiempo más prolongado con el fin de generar una homogenización de dureza en toda la pieza, la dureza esperada igualmente tomando como referencia el mismo trabajo está en un rango de 45 – 55 HRc.

- **Fase 6.** Realización del temple.

Para la realización del temple se calentó la mufla del laboratorio de tratamientos térmicos de la universidad libre, hasta la 760°C de temperatura, inmediatamente se introdujeron las probetas y se esperó hasta que nuevamente el horno alcanzará la temperatura deseada. Una vez el horno llegó a los 760 grados se contabilizaron los 60 minutos, algunas especificaciones señalan 15 minutos por pulgada pero al ser mayor la temperatura se garantiza un calentamiento homogéneo en toda la pieza y una transformación mejor de martensita, luego se sacaron y se sumergieron en agua hasta alcanzar la temperatura ambiente. En la figura 10 se muestra el esquema del proceso de templado de las probetas:

Figura 10: Diagrama del proceso de templado acero Sae 1045




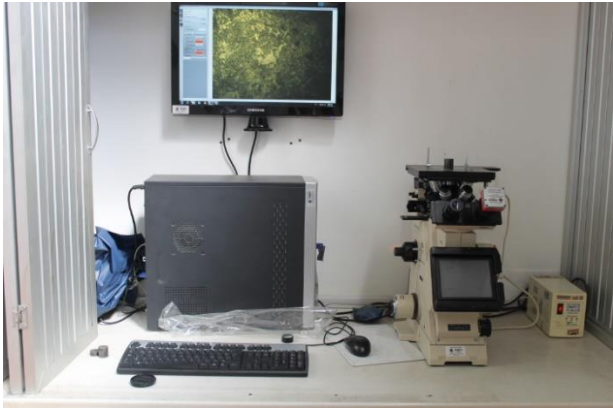
Fuente: Autor del proyecto.

- **Fase 7.** Realización de la metalografía.

Para el acondicionamiento se realiza devastado del material con papel abrasivo (lija) empezando con #80 esto con el fin de quitar la capa de óxido y poder dar una forma plana a una de las caras de la probeta para realizar la metalografía y toma de dureza. El devastado es progresivo empezando en abrasivo #80 antes dicho hasta llevarlo a #1200 con el fin de asegurar la eliminación de rayas y deformación geométrica a nivel microscópica, así generar una buena metalografía.

A continuación se muestra el proceso de metalografía en tres pasos partiendo del estado de la probeta en condición de avanzado desbaste con papel abrasivo y lista para paño como se muestra en la figura 11 para el posterior análisis en el microscopio figura 12.

Tabla 9: Esquema proceso de metalografía

<p>Pulido y desbaste</p>	<p>El pulido final se realiza con paño en pulidora metalográfica con alúmina de 0.3 micras disuelta en agua destilada, a una velocidad de 150 rpm, de esta manera, se realiza un total desbaste de las rayas más pequeñas y el estado a brillo espejo de la probeta.</p>	<p><i>Figura 11: Fotografía Pulidora Metalográfica Forcipol 1v laboratorio de materiales y tratamientos térmicos - autorizado por la Universidad Libre.</i></p>  <p>Fuente: autor del Proyecto</p>
<p>Ataque químico</p>	<p>Al tener acabo brillo espejo en la cara de la probeta que desea examinar, se procede al ataque químico con nital al 3% sumergiendo la cara de la probeta en el nital dejando actuar por 3 segundos, inmediatamente se limpia con abundante agua.</p>	
<p>Microscopio</p>	<p>Luego del ataque químico procedemos a llevarla al microscopio con el fin de analizar su microestructura, y toma de dureza con solo templado, de esta manera confirmamos el estado doble fase del material.</p>	<p><i>Figura 12: Fotografía probeta sobre microscopio Metalográfico marca Olympus de 1000x laboratorio de materiales y tratamientos térmicos – autorizado por la Universidad libre</i></p> 

- **Fase 8.** Cálculo de la dureza teórica de revenido en función de la temperatura.

Para el cálculo de la dureza utilizamos el Parámetro de revenido descrito por los autores J.H Hollomon y J. Jaffe donde calculamos H, que está en función de la temperatura de revenido, el tiempo de sostenimiento y una constante que depende del tipo de material.

Para el cálculo, se utilizó la ecuación 3, *Cálculo de parámetro Hollomon - Jaffe*, seguido se encontró la dureza estimada para cada valor con la figura 6, *Gráfica de dureza vs parámetros Hollomon – Jaffe*, descritos anteriormente en el diseño teórico, los resultados se encuentran expuestos en el siguiente capítulo, resultados y discusión.

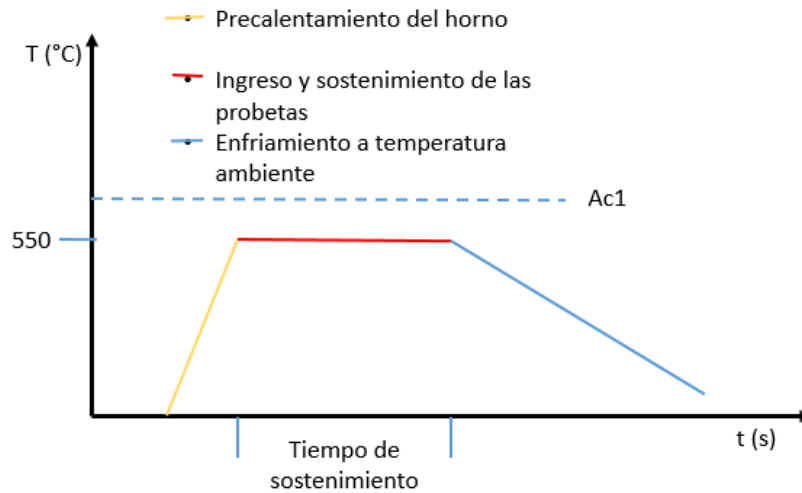
- **Fase 9.** Realización del revenido

Para la realización del revenido se calienta nuevamente la mufla hasta alcanzar la temperatura de 550°C y se procede nuevamente a ingresar las probetas, como el tiempo de permanencia varía, este se realiza en 4 grupos de 8 probetas, el primero con un tiempo de sostenimiento de 15 minutos, el segundo 30 minutos y el tercero y cuarto con tiempos de 45 y 60 minutos respectivamente.

El tiempo y temperatura seleccionados se toman como referencia del trabajo realizado por (Bohorquez, Carlos et al) en el trabajo titulado “CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO AISI/SAE 1045 TRATADO TÉRMICAMENTE EN EL INTERVALO INTERCRÍTICO”, con el fin de obtener un ablandamiento significativo de la martensita presente después del temple, de esta manera se generará gran cambio significativo en la dureza, esto con el propósito de comparar mejor el método de Hollomon – Jaffe con el material en estado bifásico con propiedades mecánicas más dúctiles.

A continuación se muestra el diagrama del procedimiento de revenido:

Figura 13: Diagrama de proceso de revenido acero 1045

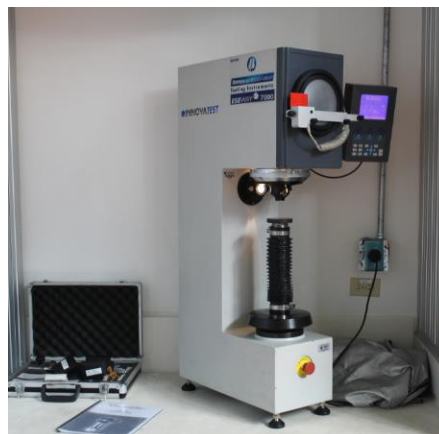


Fuente: Autor Del Proyecto

- Fase 10. Medición de dureza en las probetas.

Para la medición de dureza, se utilizó el durómetro marca INNOVATEST Nexus 7000 SERIES, del laboratorio de tratamientos térmicos de la Universidad Libre, registrando 5 datos por probeta en escala Rockwell c, para así determinar la dureza promedio de cada una, llegando al valor real para cada grupo.

Figura 14: Fotografía Durómetro INNOVATEST Nexus 7000 laboratorio de tratamientos térmicos Universidad Libre



Fuente: autor del Proyecto.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE DUREZA

Para el ensayo de dureza, se han referenciado con el nombre de A, B, C y D para cada grupo de probetas revenidas a 15, 30, 45 y 60 minutos de sostenimiento respectivamente con una temperatura igual para todas de 550°C, cada grupo de 8 se toma 5 mediciones por probeta para deducir un valor promedio de dureza.

Tabla 10: Datos dureza de Probeta con revenido a 15 y 30 minutos de sostenimiento.

DUREZA REGISTRADA DIFERENTES TIEMPOS DE REVENIDO												
NÚMERO	REVENIDO 15 MINUTOS						REVENIDO 30 MINUTOS					
	D1	D2	D3	D4	D5	PROM	D1	D2	D3	D4	D5	PROM
PROBETA 1	26,7	25,4	27,5	27,1	25,7	26,5	27,9	30,9	28,3	26,5	30,2	
PROBETA 2	28,8	20,1	30,9	29,1	21,6	26,1	25,5	26,6	30,8	30,6	25,1	27,7
PROBETA 3	29,5	30,3	30,4	28,2	27,8	29,2	23,8	23,5	26,7	29,4	25,2	25,7
PROBETA 4	26,6	28,1	26,6	25,7	27,6	26,9	31,4	31,9	30	31,9	30,9	31,2
PROBETA 5	28,4	24,8	24,9	29,1	29,7	27,4	24,8	29,6	29,3	24,5	29,3	27,5
PROBETA 6	26,9	25,7	29,2	30,5	28,6	28,2	25	25,8	20,2	28,2	24,9	24,8
PROBETA 7	25,1	27,4	29,4	25,1	28	27	26	26,1	26,4	28,9	28,2	27,1
PROBETA 8	34,4	31,9	39,7	30,6	31,4	33,6	23,5	24,4	23,2	27,8	26,2	25
			DUREZA PROMEDIO			28,1				DUREZA PROMEDIO		27,2

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 11: Datos dureza de Probeta con revenido a 45 y 60 minutos de sostenimiento

DUREZA REGISTRADA DIFERENTES TIEMPOS DE REVENIDO												
NÚMERO	REVENIDO 45 MINUTOS						REVENIDO 60 MINUTOS					
	D1	D2	D3	D4	D5	PROM	D1	D2	D3	D4	D5	PROM
PROBETA 1	25,4	25,8	26,3	22,9	23,3	24,7	24,8	22	26,5	23,2	21,4	23,6
PROBETA 2	25,7	26,1	25,1	26,9	27,6	26,3	17,7	26,4	22,1	21,7	22,9	22,1
PROBETA 3	25,9	26,2	27,1	27,1	26,1	26,5	24,7	26,7	23,6	25,6	25,7	25,3
PROBETA 4	22,9	23,4	27,2	26,9	24,6	25	23,9	21,4	24,7	27,7	22,4	24
PROBETA 5	25,7	24,5	26,4	26,4	27,6	26,1	25,3	27,4	24,2	22,7	21,8	24,3
PROBETA 6	23,2	26,6	21,9	26,8	24,8	24,6	24,4	25,5	26,6	25,2	24,8	25,3
PROBETA 7	23,5	23,9	26,1	26,5	27,8	25,5	26,3	26,1	26,5	25,7	21,4	25,2
PROBETA 8	26,3	25,9	26,9	19,4	25,1	24,7	25,7	21,4	26,6	20,4	21	23
		DUREZA PROMEDIO				25,4	DUREZA PROMEDIO				24,1	

Fuente: Autor del proyecto

7.1.1 Dureza revenido 15 minutos de sostenimiento.

En la tabla número 10 se muestran los datos de dureza tomados a la probeta revenida a 550°C sostenido durante 15 minutos, de las 5 mediciones hechas a cada probeta se calculó un valor promedio para determinar la dureza de cada probeta, luego con esos valores se determinó la dureza media para el material tratado en estas condiciones con un valor de 28.1 HRc.

La dureza en las probetas muestra similitud en sus valores encontrándose una baja desviación estándar en los datos encontrados en las probetas 1 – 7 siendo un poco mayor para probeta número 8 con respecto a las demás.

7.1.2 Dureza revenido 30 minutos de sostenimiento

En la tabla número 10 se muestran los datos de dureza tomados para las probetas revenidas con tiempo de sostenimiento de 30 minutos, se observa poca variabilidad de los valores de dureza respecto a los anteriormente analizados, se encuentra en general baja dispersión de los datos siendo un poco más similares los resultado entre probetas.

La dureza teórica para el material tratado en estas condiciones en promedio es de 27.2 HRc, un punto menor con respecto a la revenida a 15 minutos.

7.1.3 Dureza revenido 45 minutos de sostenimiento

Los datos de dureza para la probeta revenida con 45 minutos de sostenimiento se muestran en la tabla 11, aquí se aprecia una mayor similitud en los datos de dureza hallados entre las probetas lo que genera aún, una menor desviación entre los valores con respecto a un valor promedio.

Se puede apreciar una reducción más significativa de dureza con respecto a las probetas con 15 minutos revenido, con un valor promedio de 25.4 HRc.

7.1.4 Dureza revenido 60 minutos de sostenimiento.

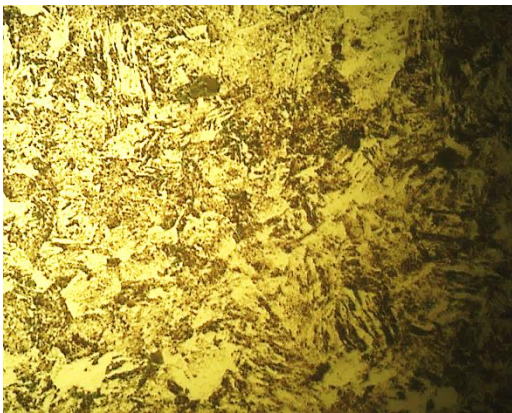
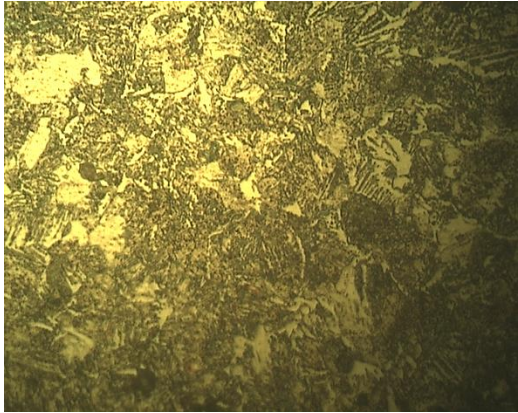
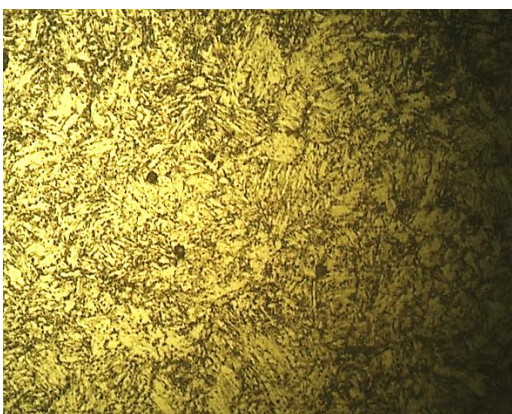
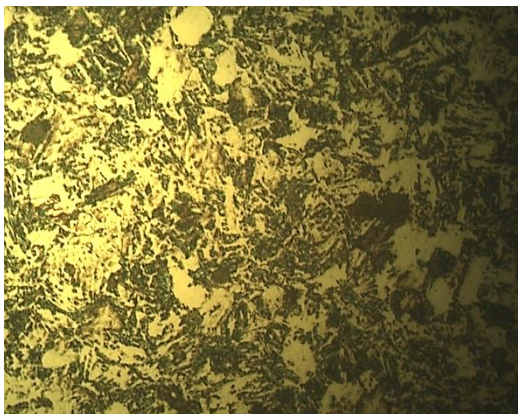
En la tabla número 11, se registran los datos de dureza del material revenido con un tiempo de sostenimiento de la temperatura de 60 minutos, con una dureza de 24.1 HRC se observa en general con los datos obtenidos una diferencia más significativa del ablandamiento de la martensita con respecto a los casos anteriores, aunque siendo el mayor tiempo de sostenimiento no es la variable más significativa en el cambios de dureza generados en el material.

A partir de estos resultados se infiere que la transformación más severa se lleva a cabo en los 15 primeros minutos de sostenimiento, incrementando el tiempo de revenido no genera un cambio relevante en la dureza del material como se puede observar en los datos tomados a especímenes con 2, 3 y 4 veces el tiempo de sostenimiento, comparado con el primero. De acuerdo con los datos, también se observa que aunque la mayor y menor dureza se registra con la probeta tratada con 15 y 60 minutos de revenido respectivamente, no son valores relativamente distantes, ya que de los diferencian tan solo 4 puntos de dureza en escala Rockwell, lo que supone un comportamiento lineal del revenido en estas condiciones.

7.2 METALOGRAFÍAS

A continuación se muestra en la tabla 12, las metalografías realizadas a las probetas con distintos tiempos de revenido

Tabla 12: Metalografías realizadas probetas I templadas intercríticamente con diferentes tiempos de revenido

<i>Figura 15: Microestructura probeta 15 minutos de revenido 1000x</i>	<i>Figura 16: Microestructuras probeta 30 minutos de revenido 1000x.</i>
	
<i>Figura 17: Microestructuras probeta 45 minutos de revenido 1000x.</i>	<i>Figura 18: Microestructuras probeta 60 minutos de revenido 1000x.</i>
	

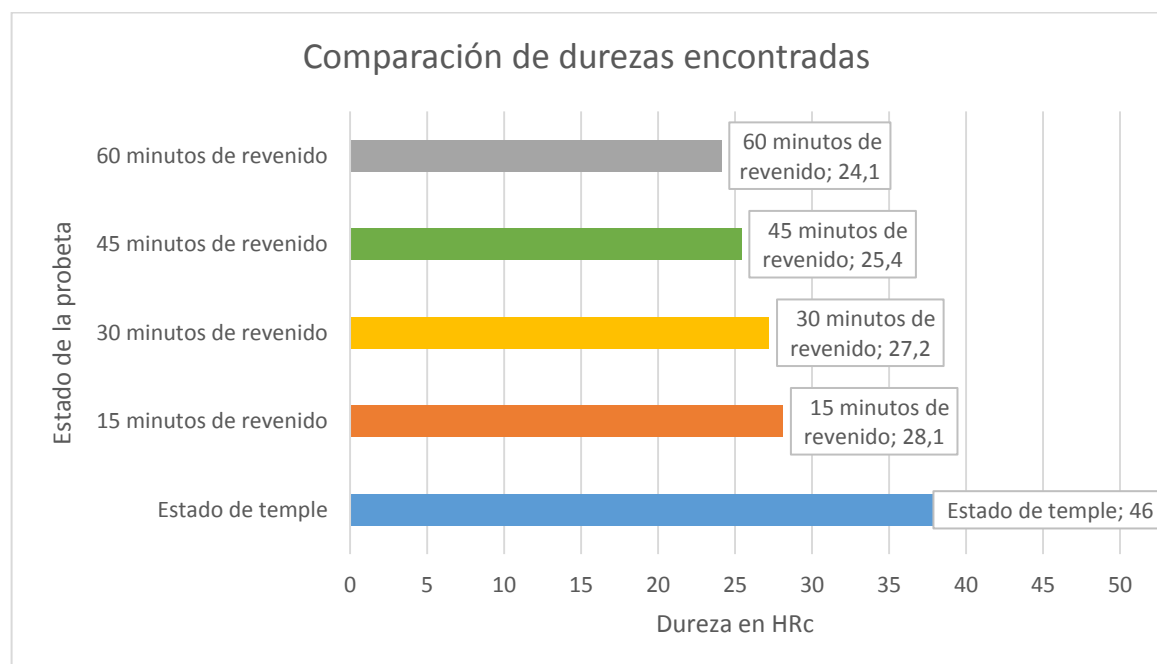
Las figuras 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4, muestran las metalografías realizadas al material después de revenido con 15, 30, 45 y 60 minutos respectivamente. La microestructura evidencia su composición bifásica compuesta por una matriz ferrítica con pequeñas islas de martensita, aunque también se refleja también en muy baja cantidad de pequeños rastros de perlita.

Al comparar la microestructura se observa una diferencia más marcada de martensita en la figura 7.1 correspondiente a la probeta con menor tiempo de sostenimiento en el revenido, comparado con la figura 7.4 la cual muestra una microestructura un poco menos laminar en la probeta con mayor tiempo de sostenimiento en el revenido.

La similitud en la microestructura del material se relaciona con el poco cambio generado con el revenido en cuanto a la dureza del material ya que tampoco hubo un cambio significativo como se mostró anteriormente, aunque se observa que dado el rango de temperatura tan alto del revenido generó un re afinamiento de grano en las probetas.

7.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DUREZAS.

Figura 19 Comparación durezas experimentales (reales)



Fuente: Autor del Proyecto

De acuerdo con la figura 7.9 en este caso el tiempo no es una variable que comprometa la dureza del acero en el revenido, después de los 15 se alcanza un equilibrio en el que ocurren pocos cambios, para una mayor transformación, podría tener una mayor incidencia la temperatura o la velocidad de enfriamiento que se utilice con el tratamiento, así como la utilización de tiempos muchos más prolongados de sostenimiento.

Es evidente el cambio tan grande en la dureza, dada las condiciones de alta temperatura del revenido, comparando la dureza en estado de temple con la dureza del mayor tiempo de revenido se puede apreciar que ocurre una reducción en este valor casi de la mitad, lo cual es una transformación muy grande para tiempo relativamente cortos de sostenimiento.

7.4 RESULTADOS CÁLCULO DEL PARÁMETRO HOLLOMON – JAFFE

Tabla 13: Resultados cálculo de parámetro P Hollomon – Jaffe.

	Constante c (depende del % de carbono)	Temperatura en grados Kelvin	Tiempo en segundos de revenido	$P = T (c + \log(t))$
PROBETA A (15min)	14.3	823	900	14200
PROBETA B (30min)	14.3	823	1800	14450
PROBETA C (45min)	14.3	823	2700	14593
PROBETA D (1hora)	14.3	823	3600	14695,7

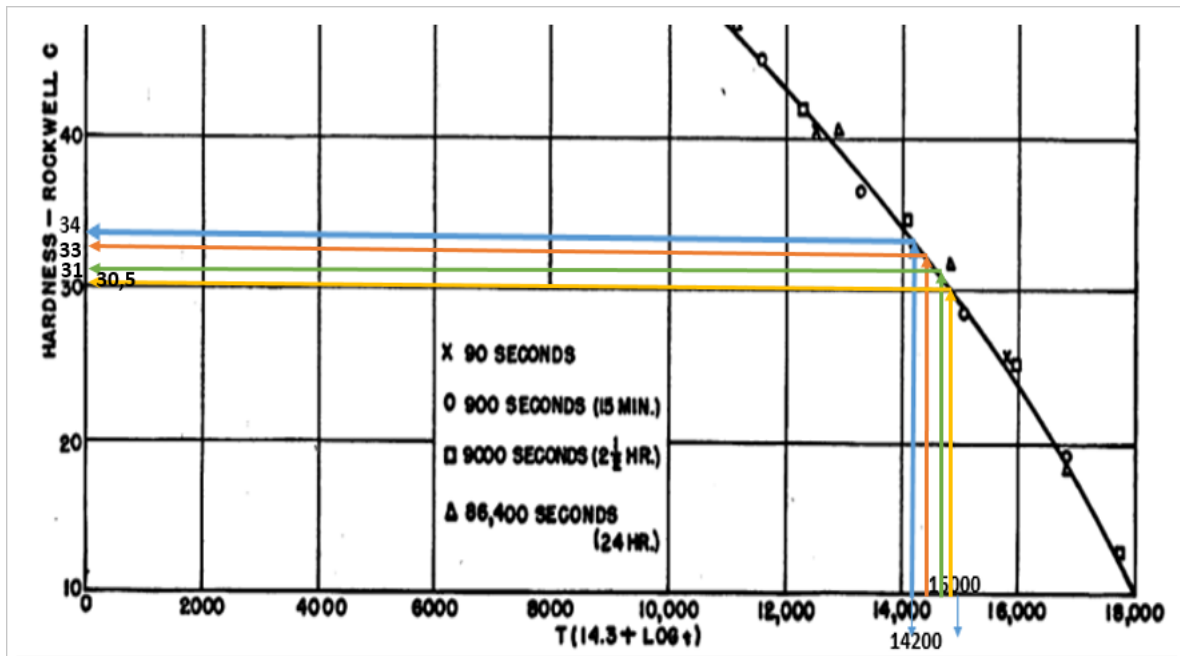
Fuente: Autor del proyecto

Para el cálculo del parámetro de Hollomon – Jaffe se realizó con las variables y valores descritos previamente en el diseño experimental, en la tabla número 12 se muestran los valores puntuales usados en cálculo del parámetro de cada conjunto de probetas, una vez se tuvieron estos valores se procedió a calcular P, y con la

ayuda de la gráfica que relaciona este valor y la dureza estimada, se generó el otro punto de comparación que es la dureza hallada teóricamente.

A continuación se muestra en la figura 20, el cálculo de la dureza teórica, a partir del parámetro de Hollomon – Jaffe.

Figura 20 Gráfica dureza VS parámetro Hollomon – Jaffe primer tiempo de revenido.



Fuente: [24] adaptada para el desarrollo del proyecto

El primer valor de parámetro es de $P = 14200$, al cruzar una línea en forma recta hasta que se intercepte con la curva y relacionar con el eje Y, se obtiene una dureza aproximada de 34 HRC, de esta forma se obtiene el valor de la dureza teórica en función de P.

Para el segundo tiempo de revenido el parámetro es 14450, el cual en la gráfica infiere un valor de dureza aproximado de 33 HRC, valor relativamente menor en comparación con el primer valor de dureza teórico.

Se observa que estos dos primeros valores de dureza precedidos con este método de 34 y 33 HRC superan en magnitud a los hallados realmente que son 28.1 y 27.2 HRC.

Con el tercer parámetro $P = 14593$ se obtuvo el valor correspondiente a la dureza teórica para 45 minutos, se muestra que al igual que en los resultados experimentales no hay una gran diferencia con los resultados obtenidos de dureza para cada una de las probetas revenidas.

Para este parámetro se calcula una dureza de 31 HRc, para las probetas tratadas con 45 minutos de revenido.

Con el cuarto valor de $P = 14700$, correspondiente al revenido de 60 minutos, se encuentra el valor aproximado de dureza de 30.5 HRc para este punto, teniendo los cuatro valores de dureza teórica se comparan con la dureza real en la siguiente tabla.

Aunque los 4 valores de dureza hallados por este medio superan al valor encontrado experimentalmente, el modelamiento de los valores del parámetro de Hollomon – Jaffe, muestra una conducta semejante a la dureza obtenida experimentalmente en la medida en que no hay una gran diferencia entre estos datos.

7.5 CÁLCULO DE DESFASE ENTRE DUREZAS REALES Y TEÓRICAS.

Tabla 14 Desfase del valor de dureza real y teórico.

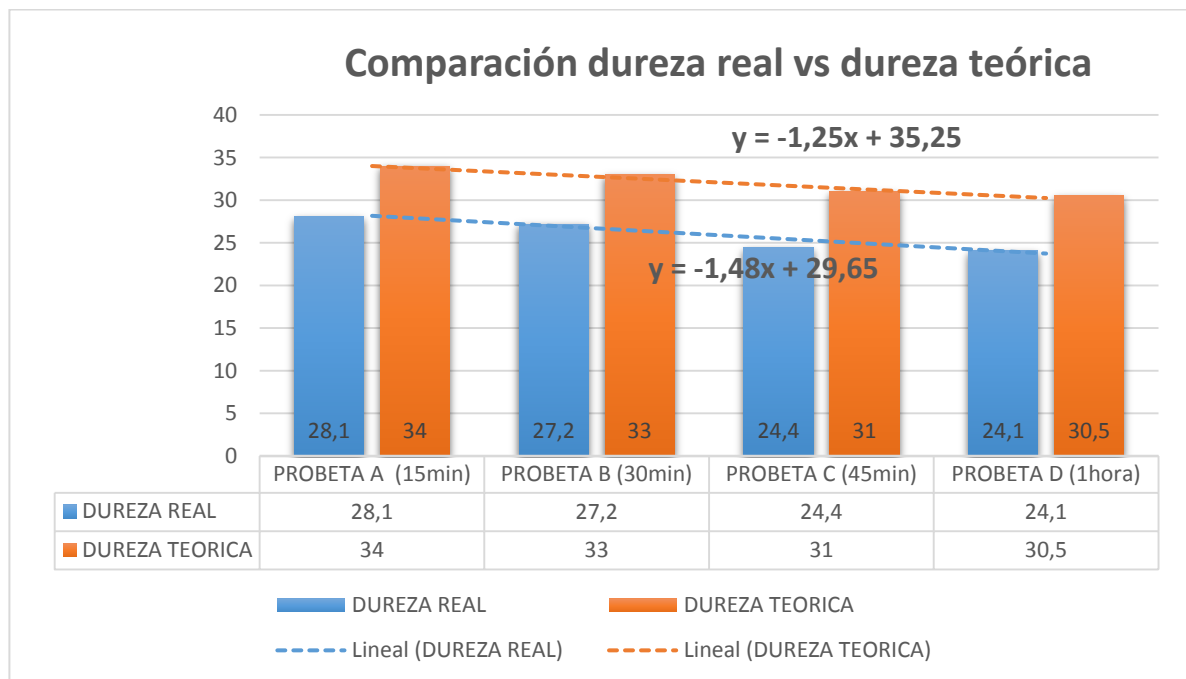
	DUREZA REAL EN HRc	$P = T (c + \log(t))$	DUREZA TEORICA EN HRc	DIFERENCIA	% DESFASE
PROBETA A (15min)	28,1	14200	34	5,9	21,0
PROBETA B (30min)	27,2	14450	33	5,8	21,3
PROBETA C (45min)	24,4	14593	31	6,6	27,0
PROBETA D (1hora)	24,1	14695,7	30,5	6,4	26,6

Fuente: Autor del proyecto

Al tener los datos de dureza calculados teóricamente se calculó el porcentaje de desfase que tienen estos con respecto a la dureza real del material, el resultado del desfase para las probetas con revenido de 45 y 60 minutos fue un poco mayor al de las probetas revenidas con 15 y 30 minutos.

Se observa que la diferencia puntual de la dureza teórica sobre la dureza real excede casi en 6 puntos siendo para los dos primeros valores, siendo mayor y por lo tanto el desfase en las probetas revenidas con 45 y 60 minutos siendo su diferencia cercana de 6.5 puntos en escala HRc.

Figura 21: Comparación dureza real vs dureza teórica



Fuente: Autor del proyecto

En la figura 21 se relacionan los datos obtenidos de dureza alcanzados por los dos métodos, se observa una linealidad en el comportamiento de la dureza en los dos casos, dado que la diferencia fue un poco mayor en las probetas de 45 y 60 minutos se observa un cambio con respecto a la ecuación de la recta, aunque se puede apreciar que prácticamente son paralelas.

El hecho de que la pendiente sea negativa indica, una disminución gradual de la dureza con el revenido en función del tiempo, aunque dado que tienen un valor muy bajo, muestra la poca relevancia del tiempo en la disminución de la dureza de las probetas, hecho que se observa claramente al relacionarlas entre sí. Por otra

parte al observar la similitud que tienen las pendientes, infiere que el modelo para el cálculo de la dureza de Hollomon – Jaffe, se comporta coherentemente con los resultados obtenidos y que el desfase o incongruencia entre ellas puede estar relacionado a la austenización incompleta realizada en el tratamiento térmico, lo que evidenciaría que este modelo para el cálculo de dureza en este tipo de aceros, carece de confiabilidad y precisión en los resultados.

También se observa que la reducción de dureza con el método teórico de grupo a grupo es igualmente gradual entre ellas, al igual que en los resultados obtenidos experimentalmente.

8. CONCLUSIONES

Se determinó que el método para la predicción de dureza de Hollomon - Jaffe no presenta confiabilidad cuando el tratamiento térmico es realizado a austenización incompleta como se evidencia en los resultados de esta investigación, ya que los valores de dureza calculados con este método distan con los valores tomados experimentalmente, aunque como se ve en la gráfica 21 muestra un comportamiento similar en los datos obtenidos, ya que cambian en la misma proporción, este comportamiento se puede observar en las líneas de tendencias de dureza real y experimental ya que se comportan de forma paralela y su ecuación cambia muy poco.

El desfase de las dos rectas de dureza de la figura 21, puede ser causado por el contenido de ferrita en la microestructura del material, lo que causa una diferencia en los valores de dureza hallados por los dos métodos.

La dureza en general para las probetas se reduce considerablemente por la alta temperatura de revenido, a causa de que los átomos carbono migran de la tetragonalidad de la martensita cambiado de estructura pasando de tetragonal a cúbica centrada en el cuerpo, o ferrita sobresaturada, ya que este carbono tiene mayor facilidad para difundir, lo que acelera el proceso de precipitación de la Cementita.

La dureza registrada en la probeta con solo temple intercrítico fue de 46 HRC, lo que muestra una transformación casi completa de la martensita templada en el primer tiempo de sostenimiento, debido a que la alta temperatura a la que se llevó el revenido permite un gran ablandamiento de la martensita lo que generó que la dureza disminuyera casi a la mitad, la alta temperatura también influyó en el asentamiento de matriz ferrítica.

Un revenido alto como el realizado al material de investigación muestra que para aplicaciones que demanden gran dureza en el material no es la mejor opción, lo que infiere que este tipo de tratamiento podría tener mejores resultados en aplicaciones que demanden de él propiedades elásticas como resistencia a la fatiga.

Debido a que los datos no tienen un cambio significativo en la dureza, se podría inferir que el cambio en las propiedades mecánicas del material está en función de la temperatura a la que se realice el revenido y no en el tiempo de sostenimiento de este.

9. RECOMENDACIONES

Con el fin de ampliar la investigación en este tipo de aceros, se recomienda realizar estudios que permitan conocer que validez y confiabilidad presenta la expresión matemática de Hollomon – Jaffe en condiciones de tratamientos térmicos de austenización completa.

Es importante estudiar el desfase en los valores de dureza en este tipo de aceros, realizando revenidos a diferentes temperaturas, en condiciones de revenido en el que no sea tan drástico el ablandamiento por este tratamiento.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aceros Bravo. (2009). Catálogo de Productos. *Aceros al Carbono*.
- [2] ANAZADEH ZAYED, A. Y KHEIRANDISH. Sh. (2011). *Affect of the tempering temperature on the microstructure and mechanical*. TEHRAN.
- [3] ARISTIZABAL, R.; FOLEY, R Y DRUSCHITZ, A. (2012). *INTERCRITICALLY AUSTENITIZED QUENCHED AND TEMPERED DUCTILE IRON*. MEDELLÍN.
- [4] ASM HANDBOOK. (1991). *Volume 4 Heat Treating*.
- [5] ASM HANDBOOK. (2000). *Mechanical Testing and Evaluation*. Publicación 2000, Volumen 8, 10ª edición 416p.
- [6] ASM HANDBOOK, Properties and Selection. (1990). *Irons, Steels, and High Performance Alloys*. Volumen 1, 10ª edición. 666p.
- [7] ASTM INTERNATIONAL. (1998). *Standard Test Method For Brinell Hardness Of Metallic Materials*. UNITED STATES.
- [8] ASTM INTERNATIONAL. (1998). *Standard Test Method For Rockwell Hardness Of Metallic Materials*. UNITED STATES.
- [9] BELZUNCE, F. (2001). *ACEROS Y FUNDICIONES: ESTRUCTURAS, TRANSFORMACIONES, TRATAMIENTOS TERMICOS y APLICACIONES*. OVIEDO.
- [10] BOHÓRQUEZ, Carlos A. (2012). *INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO SAE 1045*. SALTA.
- [11] CALLE, GABRIEL; HENAO, EDISON. (2010). *DUREZA ROCKWELL*. PEREIRA, COLOMBIA.
- [12] Cárdenas, E et al. (2009). *ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE ACEROS DE DOBLE FASE MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO*. Oviedo, España.
- [13] CASTAÑEDA VARGAS, JHOAN FERNANDO; SILVA URUEÑA, JAYSON. (2015). *INFLUENCIA DEL TIEMPO DE REVENIDO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DUREZA Y RESISTENCIA A LA TENSION DE UN ACERO SAE 1045*. BOGOTÁ, COLOMBIA.

- [14] DE LA CONCEPCION, Valeria; LORUSSO, Hernán y SVODOBA, Hernán. (2013). *Effect of carbon content on microstructure and mechanical properties of dual phase steels*. BUENOS AIRES.
- [15] Diaz del castillo, Felipe. (2009). *LOS NUEVOS ACEROS PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ*. CUAUTITLÁN IZCALLI .
- [16] DOUGLAS C. Montgomery. (2004). Diseño y análisis de experimentos. Limusa wiley S.A pag 648.
- [17] *Effects of quenching and tempering on the microstructure and bake hardening behavior of ferrite and dual phase steels*. (2014). BEIJING.
- [18] Finite Elements in Analysis and Design. (2003). *A FEM modeling of quenching and tempering and its application in industrial engineering*.
- [19] GHAERI, Ali; SHAFYEI, Ail Y HONARMAND, Mehrdad. (2014). *Effects of Inter-critical Temperatures on Martensite Morphology*. TIRAN.
- [20] HAYAT, Fatih y UZUN, Huseyin. (2011). *Effect of Heat Treatment on Microstructure Mechanical Properties and*. SAKARYA.
- [21] HUSEYIN, Aydin; ZEYTIN HAVVA, Kazdal y CEYLAN, Kubilay. (2010). *Effect of Intercritical Annealing Parameters on Dual Phase Behavior of Commercial Low-Alloyed Steels*. KOCAELI.
- [22] INTERNACIONAL ICONTEC. (23 de JULIO de 2007). DOCUMENTACION. PRESENTACION DE TESIS, TRABAJOS DE GRADO Y OTROS TRABAJOS DE INVESTIGACION. *NTC 1486 EDICION6*. BOGOTÁ: EDITADA 2008 AGOSTO 4.
- [23] INTERNATIONAL ASTM. (October de 1997). Standard Test Methods For Vickers Hardness of Metallic Materials; designation E92-82. *ASTM 1997 Standard Test Methods for Vickers Hardness of Metallic Materials*. WEST CONSHOHOCHEN, PENSILVANIA, UNITED STATES: REAPROVED 1997.
- [24] JOSE APRAIZ BARREIRO. (1949). *TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS*. MADRID: NUEVAS GRÁFICAS S.A.
- [25] KAMPA, A.; CELOTTOB, S Y HANLONB, D.N. (2012). *Effects of tempering on the mechanical properties of high strength dual-phase steels*. NETHERLANDS.
- [26] KUANG, C.F et al. (2014). *Effects of quenching and tempering on the microstructure and bake hardening behavior of ferrite and dual phase steels*. BEIJING.

- [27] Liu, C. et al. (2002). *Numerical Modeling of Metallo-thermomechanical Behavior in Both Carburized and Carbonitrided Quenching Processes*. ISIJ International, 42(10), 1125–1134.
- [28] LORUSSO, H. et al. (2012). *Application of dual phase steels in wires for reinforcement of concrete structures*. BUENOS AIRES.
- [29] MA SAN ZAPATA, J. (2013). *DISEÑO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS I*. Piura.
- [30] MARONI, P. (s.f.). *TEMPLABILIDAD UN METODO PARA SELECCIONAR ACEROS*. Buenos Aires: Libreria Mitre.
- [31] MOVAHED, P. et al. (2009). *The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite–martensite dual phase steel sheets*. TEHRAN.
- [32] MUKHERJEE, Monideepa; DUTTA, Chaitali Y ,HALDAR, Arunansu. (2012). *Prediction of hardness of the tempered martensitic rim of TMT rebars*. Jamshedpur.
- [33] MUÑOZ BUITRAGO, Cristian; CUELLAR HIGUERA, Jhon y LÓPEZ ROBAYO, Carlos. (2014). *INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE A TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI SAE 1018. Trabajo de tesis para optar al título de ingeniero mecánico*. BOGOTÁ: Presentado a la UNIVERSIDAD LIBRE.
- [34] O.G, Kasatkin; B.B, Vinokur y V.L, Pilyushenko. (1984). *Calculation models for determining the critical points of steel* Volume 26, Issue 1, pp 27-31.
- [35] REVISTA DE METALÚRGIA. (2012). *TALADRADO PRO FRICCION ACEROS DOBLE FASE*. BILBAO.
- [36] Rodríguez Baracaldo, Rodolfo; Arroyo Osorio, José Manuel y Parra Rodríguez, Yeison. (2015). *Influencia del proceso de revenido en el comportamiento mecánico de un acero de fase dual de uso industrial automotriz*.
- [37] Sala Serra; Jordi. (Julio de 2008). *Caracterización y comparación de las propiedades mecánicas de dos chapas de propiedades mecánicas de dos chapas de (AHSS): TRIP800 Y DP800*. Barcelona, España.
- [38] SANGHOON, Noh. et al. (2013). *EFFECTS OF HEAT TREATMENTS ON MICROSTRUCTURES AND MECHANICAL PROPERTIES OF DUAL*

PHASE ODS STEELS FOR HIGH TEMPERATURE STRENGTH. Yuseong-gu.

- [39] SMITH, W. y. (2006). *Fundamentos de ciencia e ingeniería de materiales.* Mexico D,F: Mc graw hill.
- [40] TARÍN, P.; SALAMANCA, A. Y PÉREZ, J. (2005). *Comprobación experimental de métodos de cálculo de propiedades obtenibles mediante temple y revenido, en aceros de baja aleación.* MADRID.
- [41] WILLIAM, D. y. (1995). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* UTAH: Reverté.
- [42] WILLY. (2007). *Diagrama Fe-C metaestable. Zona de los aceros.*
- [43] YANZÓN, Rodolfo. et al. (2013). *PREDICCIÓN DE LA DUREZA DE UN ACERO REVENIDO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA COMPOSICIÓN QUÍMICA.* PROVINCIA DE SAN JUAN.

ANEXOS

Anexo-1

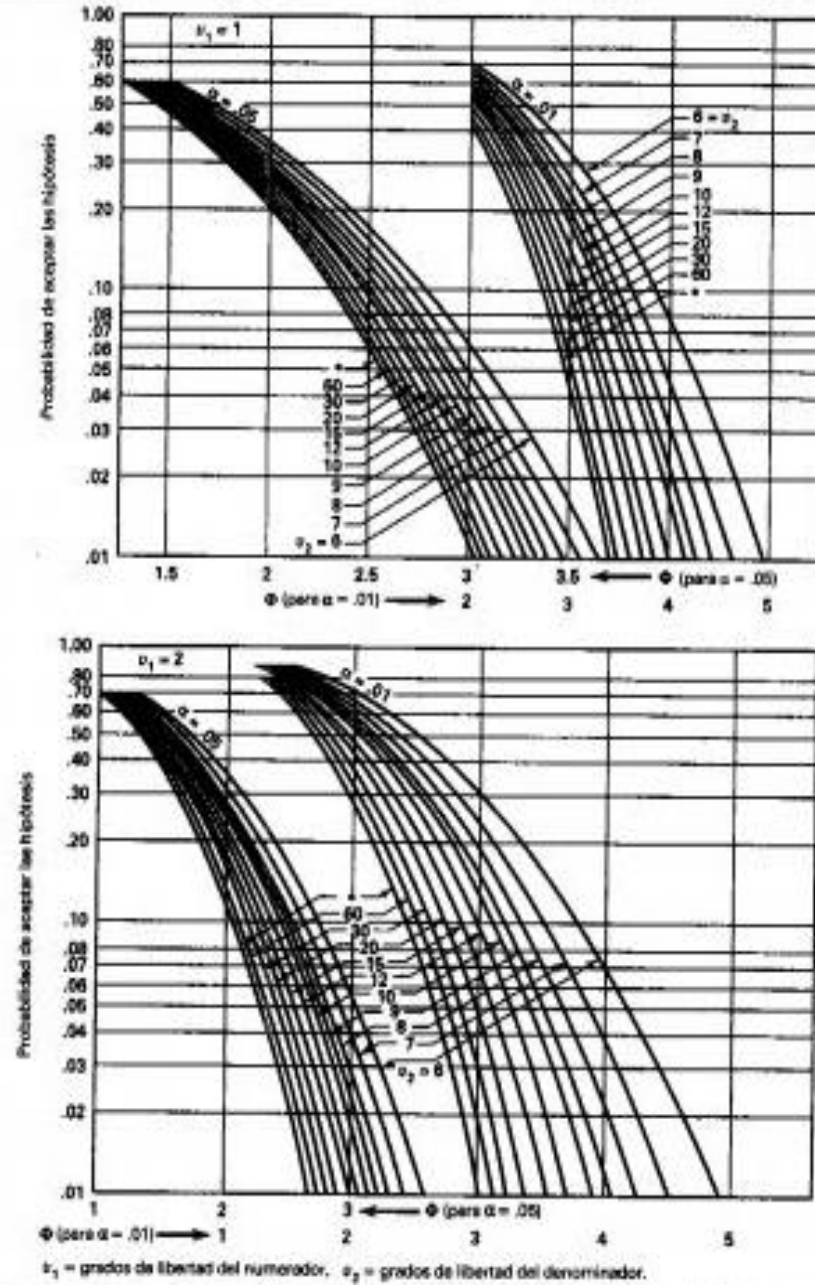
COMPOSICION QUIMICA ACERO 1045

Burn 1					
Fe	97.972	C	0.448	Mn	0.721
Si	0.212	Cu	0.032	Ni	0.032
Mo	0.074	W	< 0.005	Co	0.006
Al	0.128	Nb<	0.002	B	< 0.0001
				P	< 0.001
				Cr	0.366
				Ti	0.002
				Pb	0.004
				S	< 0.001
				V	0.003
				Sn<	0.001
				Mg	0.000
Burn 2					
Fe	97.981	C	0.449	Mn	0.748
Si	0.217	Cu	0.034	Ni	0.034
Mo	0.074	W	< 0.005	Co	0.007
Al	0.069	Nb<	0.002	B	< 0.0001
				P	< 0.001
				Cr	0.378
				Ti	0.002
				Pb	0.003
				S	< 0.001
				V	0.003
				Sn<	0.001
				Mg	0.000
Burn 3					
Fe	97.932	C	0.470	Mn	0.749
Si	0.223	Cu	0.033	Ni	0.034
Mo	0.076	W	< 0.005	Co	0.007
Al	0.080	Nb<	0.002	B	< 0.0001
				P	< 0.001
				Cr	0.380
				Ti	0.002
				Pb	0.003
				S	0.002
				V	0.003
				Sn	0.001
				Mg	0.000
Average					
Fe	97.962	C	0.456	Mn	0.739
Si	0.218	Cu	0.033	Ni	0.033
Mo	0.074	W	< 0.005	Co	0.007
Al	0.092	Nb<	0.002	B	< 0.0001
				P	< 0.001
				Cr	0.375
				Ti	0.002
				Pb	0.003
				S	< 0.001
				V	0.003
				Sn<	0.001
				Mg	0.000

Anexo-2

APEN

V. Curvas de operación característica para el análisis de varianza del modelo con efectos fijos*

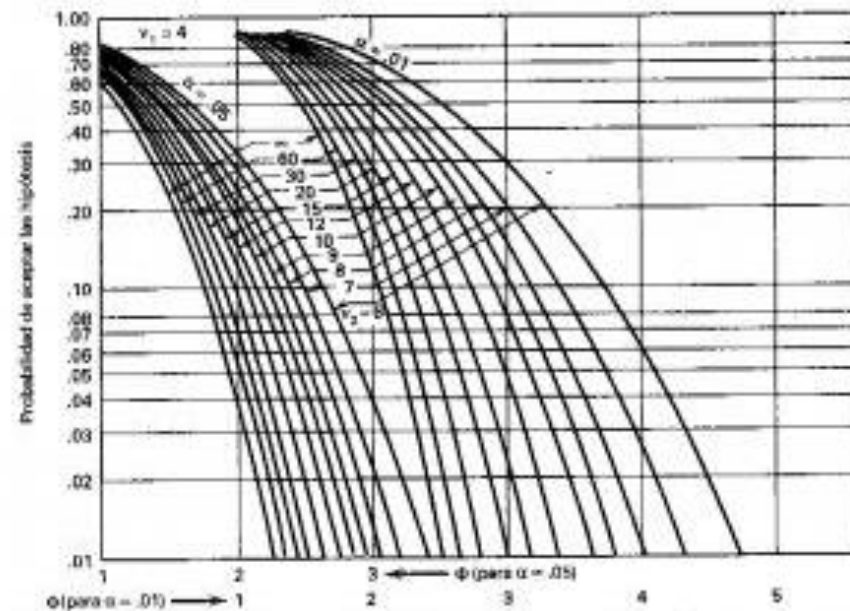
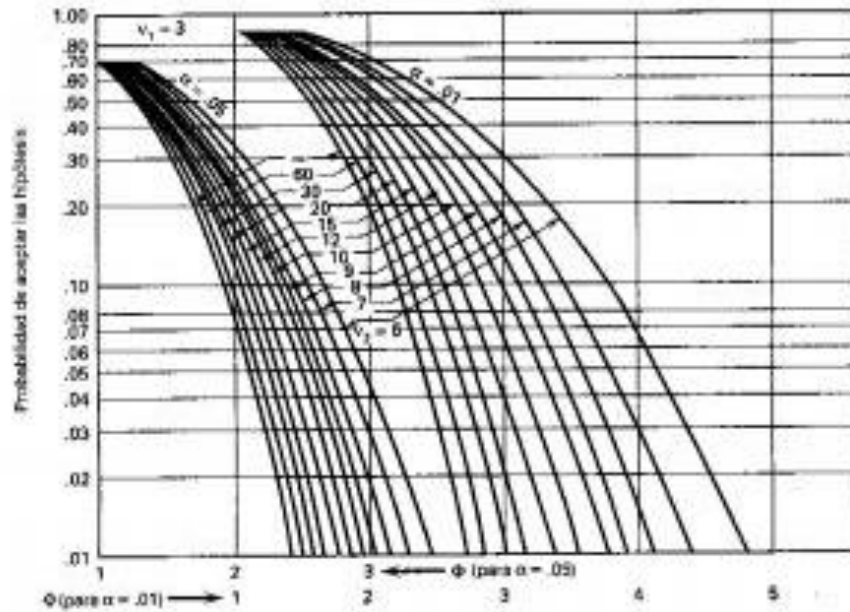


*adaptada con permiso de *Biometrika Tables for Statisticians*, vol. 2, E.S. Pearson y H.O. Hartley, Cambridge University Press, Cambridge

Anexo-2 continuación

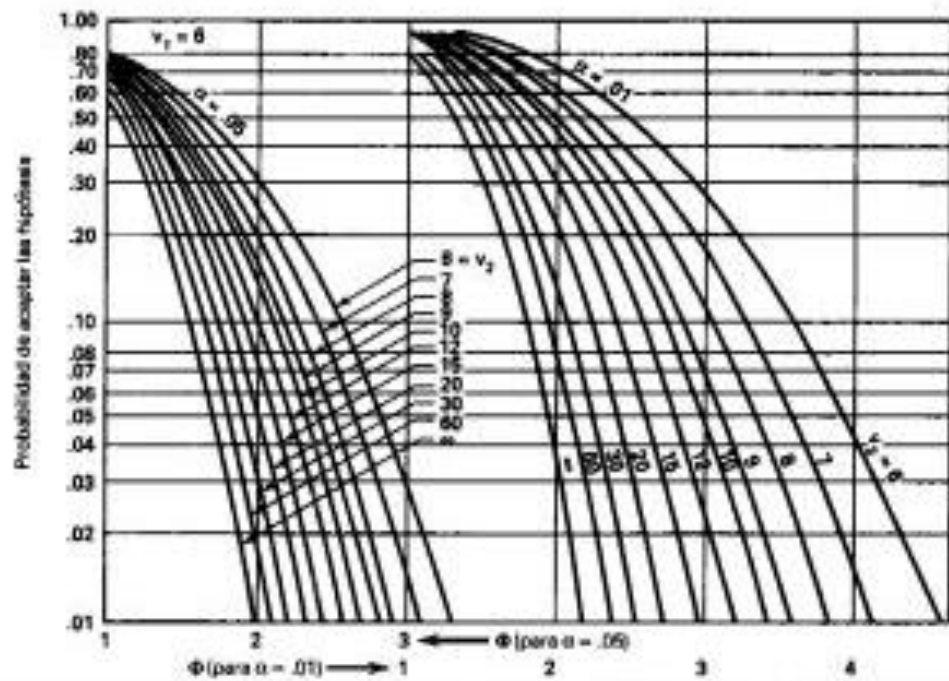
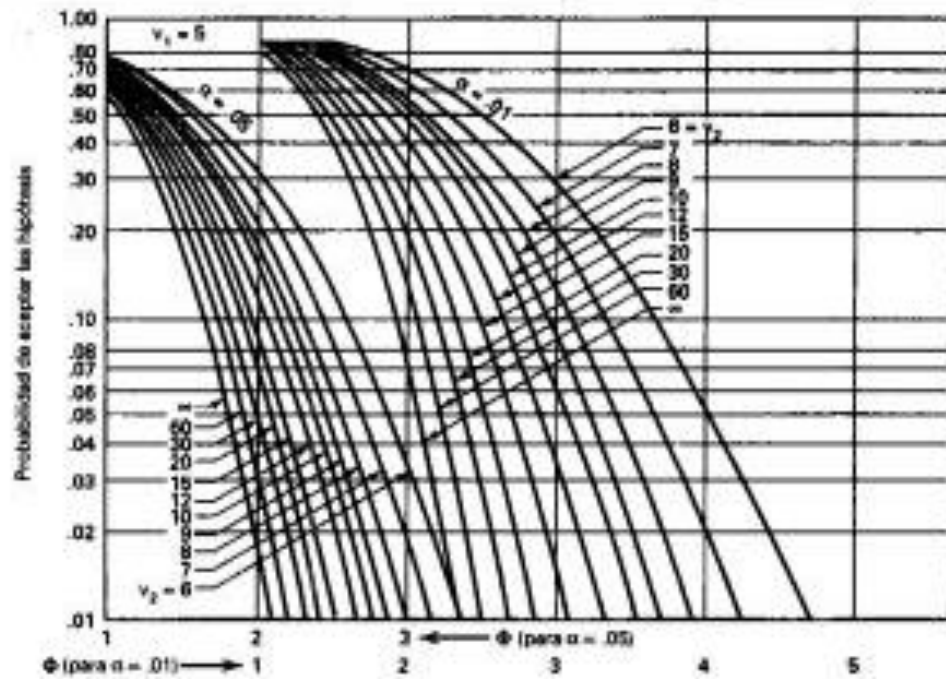
648 APÉNDICE

V. Curvas de operación característica para el análisis de varianza del modelo con efectos fijos (continuación)



Anexo-2 continuación

V. Curvas de operación característica para el análisis de varianza del modelo con efectos fijos (continuación)



Anexo-2 continuación

650 APÉNDICE

V. Curvas de operación característica para el análisis de varianza del modelo con efectos fijos (continuación)

